

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки _____ 6.050801 Мікро-та наноелектроніка
(код і назва)

на тему: Дослідження електрофізичних властивостей МДН-структури за допомогою вольт-фарадних характеристик

Виконав : студент 4 курсу, групи ДП-52
(шифр групи)

_____ Самусь Олександр Станіславович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ ас.каф. МЕ Королевич Л.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю проф., к.т.н., доц.. Орлов А.Т. _____

Консультант з інформаційних питань доц.. к.т.н., Діденко Ю.В. _____

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 56 сторінках, вини містять 4 розділи, 26 ілюстрацій та 15 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є ВФХ МДН-структури. Предмет дослідження – порівняльний аналіз існуючих методів дослідження електрофізичних властивостей МДН-структури за допомогою ВФХ та розробка і удосконалення методів аналізу ВФХ.

Метою роботи є розкриття проблеми необхідності високоточного дослідження електрофізичних властивостей МДН-структури для вдосконалення приладів на їх основі.

У першому розділі досліджено протікання зарядів і процеси на границі поділу діелектрик-напівпровідник. У другому проведено аналіз класичного методу дослідження електрофізичних властивостей МДН-структури і експериментальне їх визначення. Третій розділ присвячений розгляду впливу поверхневих станів на ВФХ МДН-структури, а також розробка нового методу для знаходження напруги плоских зон за експериментальними кривими. В четвертому розділі проведено експеримент для підтвердження актуальності даного методу.

МДН-СТРУКТУРА, ВФХ, НАПРУГА ПЛОСКИХ ЗОН

ANNOTATION

The thesis was carried out on page 57, the guilt contains 4 sections, 26 illustrations and 15 sources in the list of references.

The object of study is the CV characteristics of the MIS structure. The subject of the research is a comparative analysis of the existing methods for studying the electrophysical properties of a MIS structure using the CV characteristics and the development and improvement of the methods of analyzing the CV characteristics.

The aim of the work is to reveal the problem of the need for highly accurate studies of the electrophysical properties of a MIS structure to improve devices based on them.

In the first chapter, the course of charges and the processes at the interface of the dielectric-semiconductor are investigated. In the second, the analysis of the classical method for studying the electrophysical properties of a MIS structure and their experimental determination was carried out. The third section is devoted to the consideration of the effect of surface states on the CV characteristics of the MIS structure, as well as the development of a new method for finding the voltage of flat zones from experimental curves. In the fourth section, an experiment was conducted to confirm the relevance of this method.

MIS-STRUCTURE, C-V CHARACTERISTICS, VOLTAGE OF FLAT-BAND ZONES

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	2
ВСТУП	4
1. МДН-СТРУКТУРА ЯК БАЗИС МДН-ПРИЛАДІВ.....	6
1.1 Залежність ємності напівпровідника від потенціалу на його поверхні	6
1.2 Залежність ємності МДН-структури від напруги на його завороті.....	11
1.3 Порогова напруга МДН-приладів	14
2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МДН-СТРУКТУРИ ЗА ВФХ	16
2.1 Ємність плоских зон	16
2.2 Напруга плоских зон.....	19
2.3 Порогова напруга	23
2.4 Щільність поверхневих станів.....	24
2.5 Експериментальні розрахунки.....	25
3. ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ НА ВФХ	31
3.1 Трьохконденсаторна модель МДН-структури.....	31
3.2 Особливості ВФХ в околі напруги плоских зон.....	35
3.3 Розрахунок напруги плоских зон за ВФХ	40
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВФХ КРЕМНІЄВИХ МДН-СТРУКТУР	42
4.1 Експериментальне дослідження кремнієвих МДН-структур.....	42
4.2 Аналіз основних параметрів кремнієвих МДН-структур	44
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	53

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник

ПС – поверхневі стани

ВФХ – вольт-фарадна характеристика

МОН – метал-оксид-напівпровідник

ІМС – інтегральні мікросхеми

ОПЗ – область просторового заряду

ψ_s – поверхневий потенціал

E_F - енергія Фермі

q – елементарний електричний заряд

n_0 – концентрація електронів

p_0 – концентрація дірок

N_A - концентрація акцепторів

C_{ox} - ємність діелектрика

C_{sc} - ємність ОПЗ

C_{ss} - ємність поверхневих станів

N_{ss} - щільність поверхневих станів

L_D - дабаївська довжина

ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму

ϵ_s - відносна діелектрична проникність напівпровідника

ϵ_d - відносна діелектрична проникність діелектрика

β - обернений температурний потенціал

V_G - напруга на затворі

V_T - порогова напруга

V_{FB} - напруга плоских зон

φ_{ms} — контактна різниця потенціалів

ВСТУП

Структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-структури) мають важливе значення при вивченні властивостей поверхні напівпровідників. Так як різні поверхневі ефекти безпосередньо впливають на надійність і стабільність роботи практично всіх типів напівпровідникових приладів, вивчення фізики поверхні за допомогою МДН-структури грає важливу роль у всій напівпровідниковій технології.

Складні структури різного типу, в особливості системи метал-діелектрик-напівпровідник, придбали актуальність в зв'язку з їх широким розповсюдженням в напівпровідникових пристроях. Саме такі системи складають основу майже всього сучасного напівпровідникового приладобудування в тому числі і мікроелектроніки.

Прилади на основі структур метал-діелектрик-напівпровідник, що використовуються в якості елементів МДН мікросхем, можуть виконувати функції підсилення, генерації та перетворення електричних сигналів, тобто ті ж функції, що виконують біполярні транзистори. Поряд з тим МДН транзистори можна використовувати в якості резисторів та конденсаторів, номінальні параметри яких змінюються в заданих межах при зміні прикладеного потенціалу до керуючого електрода. Крім того, МДН структури можуть виконувати функції елементів пам'яті

Подальше удосконалення пристроїв, в яких використовують МДН-структури, зв'язано з більш ретельним вивченням границі розділу діелектрик-напівпровідник, що в свою чергу потребує застосування гарно розроблених експериментальних методик дослідження. Однією з них являється метод С-V (вольт-фарадних) характеристик, що дають з більшою точністю визначити величину густини поверхневих станів.

Важливим завданням також є підвищення точності контролю електрофізичних параметрів МДН-структур вольт-фарадними методами, для чого необхідно моделювання теоретичних вольт-фарадних характеристик (ВФХ) таких

структур. Використання наближення ефективної постійної концентрації і підгінних параметрів призводить до значних похибок у визначенні напруженості плоских зон та порогового, ефективного поверхневого заряду та інших характеристик МДН-структур. Тому актуальна розробка чисельних і напіваналітичних методик моделювання ВФХ МДН-структур.

1.МДН-СТРУКТУРА ЯК БАЗИС МДН-ПРИЛАДІВ

1.1 Залежність ємності напівпровідника від потенціалу на його поверхні

Однією з основних задач при аналізі області просторового заряду напівпровідника є знаходження зв'язку між електростатичним потенціалом $\psi(z)$, з одної сторони, і заряду в області просторового заряду Q_s , надлишку електронів і дірок, ємності ОПЗ C_s – з іншої[12].

Розглянемо зонні діаграми для напівпровідника n- та p-типу.

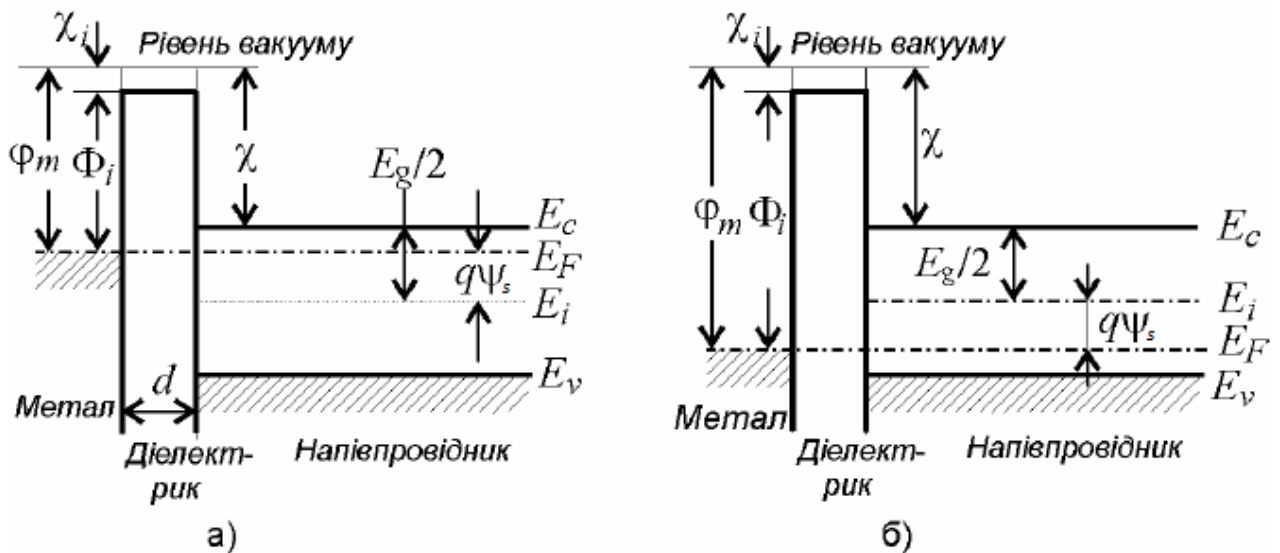


Рисунок 1.1.1. Зонні діаграми ідеальних МДН-структур при $U=0$, а – напівпровідник n-типу; б – напівпровідник p-типу.

Наявність електричного поля $E(x)$ в ОПЗ змінює величину потенційної енергії електрона в цій області. Якщо електричне поле направлено від поверхні вглиб напівпровідника, то електрони будуть мати мінімальну енергію в цьому полі поблизу поверхні, де для них енергетичний стан відповідає наявності потенційної ями. Оскільки на дні зони провідності кінетична енергія електронів дорівнює нулю, зміна потенційної енергії по координаті має змінити точно так же хід дна зони провідності, а відповідно і вершини валентної зони. Цей ефект зображений на зонних діаграмах, наведених на малюнку 1.1.2, і отримав назву

вигину енергетичних зон. Значення електростатичного потенціалу на поверхні напівпровідника називається поверхневим потенціалом і позначається ψ_s [12].

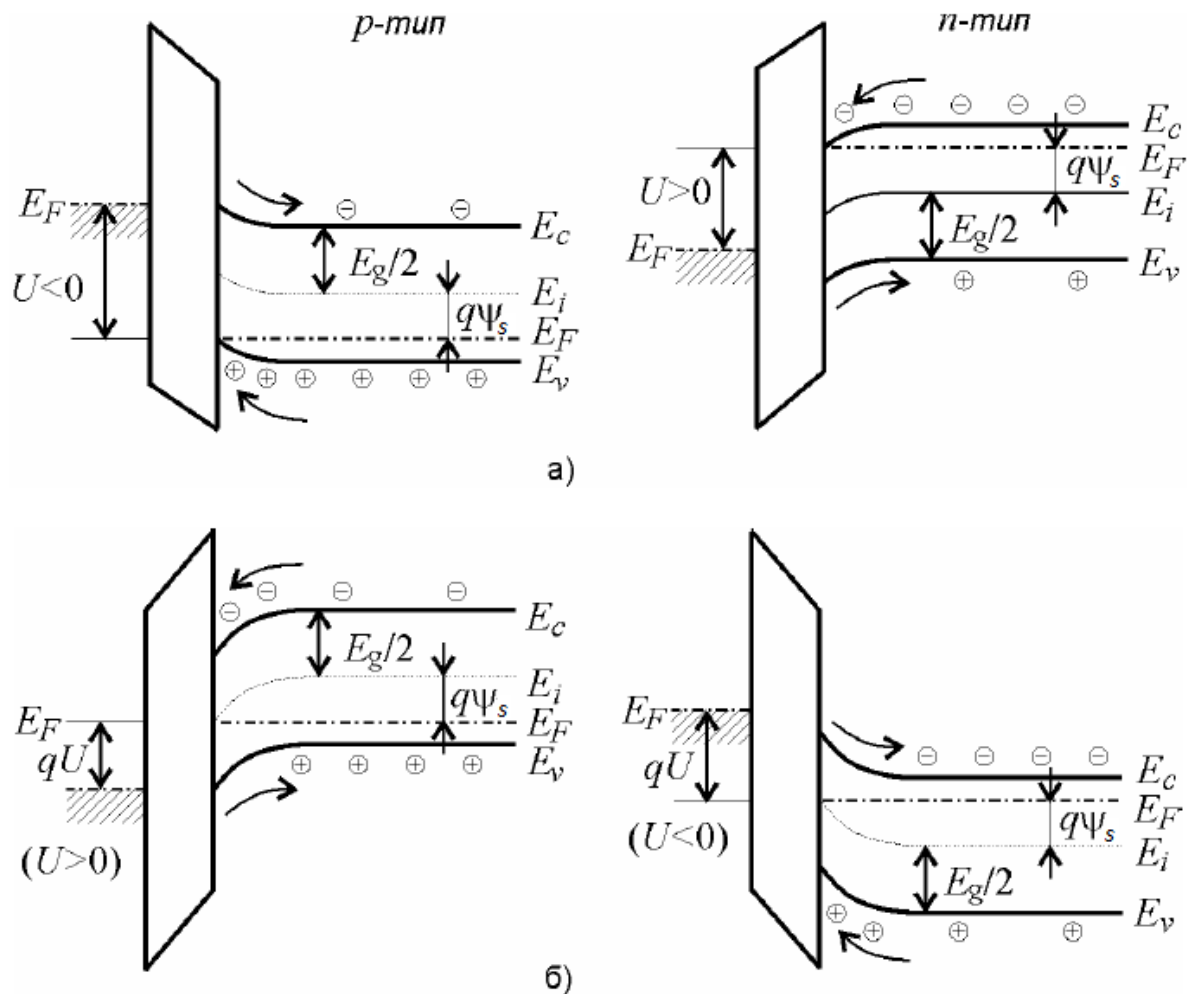


Рисунок 1.1.2. Зонні діаграми МДН-структур при $U \neq 0$, а-режим збіднення; б-режим інверсії.

Виразимо концентрацію електронів n і дірок p в ОПЗ через електростатичний потенціал ψ . В квазінейтральному об'ємі в невідродженому випадку отримаємо[2] :

$$\begin{aligned} n &= n_i e^{\beta \phi_B}, \\ p &= p_i e^{-\beta \phi_B}, \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

де $\beta = \frac{q}{kT}$, φ_B – електричний потенціал об’єму напівпровідника, що знаходиться за рівнянням[2] :

$$\varphi_B = \frac{(E_F - E_i)}{q}. \quad (1.1.2)$$

Згідно до цього виразу, об’ємний потенціал φ_B додатний для n-типу і від’ємний для p-типу. В ОПЗ електричний потенціал $\varphi(x)$ відрізняється від φ_B на величину електростатичного потенціалу $\psi(x)$. З цього,

$$\varphi(x) = \varphi_B + \psi(x). \quad (1.1.3)$$

Тоді, з урахуванням (1.1.1 і 1.1.3) величини в ОПЗ[2] :

$$\begin{aligned} n &= n_i e^{\beta\varphi(x)} = n_i e^{\beta(\varphi(x) - \varphi_B)} = n_0 e^{\beta\psi(x)}, \\ p &= p_i e^{-\beta\varphi(x)} = p_i e^{-\beta(\varphi(x) - \varphi_B)} = p_0 e^{-\beta\psi(x)}. \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

Величини концентрації електронів n_s і дірок p_s на поверхні носять назву поверхневої концентрації і мають значення[2]:

$$\begin{aligned} n_s &= n_0 e^{\beta\psi_s}, \\ p_s &= p_0 e^{-\beta\psi_s}. \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

Залежність поверхневого потенціалу від відстані до границі поділу можливо знайти за допомогою одновимірного рівняння Пуассона:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_s}, \quad (1.1.6)$$

де ε_s - діелектрична проникність напівпровідника, а $\rho(x)$ – густина повного заряду об’єму:

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p(x) - n(x)), \quad (1.1.7)$$

де N_D^+ і N_A^- - концентрації іонізованих донорів і акцепторів відповідно. Відмітимо що в об'ємі напівпровідника, виконується умова електронейтральності, тобто $\rho(x) = 0$ при $\psi = 0$, а $N_D^+ - N_A^- = n_0 - p_0$.

Тоді в загальному випадку рівняння (1.1.7) можна перетворити виходячи з (1.1.4) наступним образом[1]:

$$\rho(x) = q(p_0(e^{-\beta\psi} - 1) - n_0(e^{-\beta\psi} - 1)). \quad (1.1.7)$$

В результаті чого отримаємо наступний вираз:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon_s} \left[\frac{p_0}{n_i} (e^{-\beta\psi} - 1) - \frac{n_0}{n_i} (e^{\beta\psi} - 1) \right]. \quad (1.1.8)$$

Введемо безрозмірний електростатичний потенціал $Y = \frac{q\psi}{kT}$. Тоді вираз (1.1.9) набуде наступного вигляду:

$$\frac{d^2Y(x)}{dx^2} = \frac{q^2 n_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT} \left[\frac{p_0}{n_i} (e^{-\beta\psi} - 1) - \frac{n_0}{n_i} (e^{\beta\psi} - 1) \right]. \quad (1.1.9)$$

Ведемо наступні позначення:

$$\lambda = \frac{p_0}{n_i} = \frac{n_i}{n_0}, \quad (1.1.10)$$

де λ – міра легування.

Отримаємо :

$$2 \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} = -\frac{1}{L_D^2} [\lambda(e^{-\beta\psi} - 1) - \lambda^{-1}(e^{\beta\psi} - 1)]. \quad (1.1.11)$$

де

$$L_D^2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT}{2q^2 n_i}, \quad (1.1.12)$$

- дебаївський радіус екранування для власного напівпровідника.

Величина Y від'ємна при вигинах зон вверх і додатній при вигинах зон вниз; $\lambda > 1$ - відповідає напівпровіднику для n-типу, цьому відповідає $\lambda < 1$ - відповідає напівпровіднику р-типу.

Перший інтеграл для виразу (1.1.11) може бути отриманий з тотожності[2]:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dY}{dx} \right)^2 = 2 \frac{dY}{dx} \frac{d^2 Y}{dx^2}, \quad (1.1.13)$$

Для цього помножимо (1.1.11) на $\frac{dY}{dx}$ і отримаємо[2]:

$$d \left(\frac{dY}{dx} \right)^2 = -\frac{2q^2 n_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT} [\lambda(e^{-\beta\psi} - 1) - \lambda^{-1}(e^{\beta\psi} - 1)] dY. \quad (1.1.14)$$

Проінтегрувавши дане рівняння отримаємо [2]:

$$\frac{dY}{dx} = \frac{F(Y, \lambda)}{L_D}, \quad (1.1.15)$$

де

$$F(Y, \lambda) = [\lambda(e^{-Y} + Y - 1) + \lambda^{-1}(e^Y - Y - 1)]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.1.16)$$

Тоді для напруженості електричного поля в ОПЗ можна записати рівняння у вигляді:

$$E = -\frac{d\psi}{dx} = \pm \frac{kT}{qL_D} F(Y, \lambda). \quad (1.1.17)$$

В даному вразі знак «+» потрібно використовувати при $\psi > 0$ (що відповідає додатному потенціалу на електроді), а знак «-» при $\psi < 0$. Напруженість на поверхні напівпровідника можна отримати підставивши у (1.1.17) рівність $\psi = \psi_s$:

$$E_s = -\frac{d\psi}{dx} = \pm \frac{kT}{qL_D} F(Y_s, \lambda). \quad (1.1.17)$$

В відповідності до теореми Остроградського-Гауса об'ємний заряд, що відноситься до одиниці площі границі поділу діелектрик-напівпровідник, буде дорівнювати :

$$Q_{sc} = -\varepsilon_0 \varepsilon_s E_s = \mp \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s kT}{qL_D} F(Y_s, \lambda). \quad (1.1.18)$$

Оскільки повний заряд в ОПЗ Q_{sc} залежить від величини поверхневого потенціалу ψ_s , то область просторового заряду має певну ємність C_{sc} . Тоді ємність ОПЗ буде рівна[3] :

$$C_{sc} = \left| \frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} \right| = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{2L_D} \left| \frac{[\lambda(1 - e^{-\beta\psi_s}) - \lambda^{-1}(1 - e^{\beta\psi_s})]}{F(Y_s, \lambda)} \right|. \quad (1.1.19)$$

1.2 Залежність ємності МДН-структури від напруги на його затворі

В МДН-структурі ємність ОПЗ і шару діелектрика ввімкненні послідовно, тому загальна ємність структури буде дорівнювати:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_{sc}}, \quad (1.2.1)$$

де

$$C_D = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d}, \quad (1.2.2)$$

- ємність діелектрика одиничної площі, ε_d і d - відносна діелектрична проникність і товщина діелектрика відповідно. Так як C_{sc} залежить від поверхневого потенціалу, а його величину можна задавати напругою на електроді, то ємність МДН-структури є функцією від напруги U . Для розрахунку залежності ємності від напруги необхідно знати як пов'язані між собою ψ_s і U . В ідеальній МДН-структурі прикладена напруга ділиться між діелектриком і ОПЗ[12]. Тоді

$$U = \psi_s + U_D, \quad (1.2.3)$$

де $U_D = E_d d$ – падіння напруги на діелектрику, E_d - напруженість поля в ньому.

Використовуючи умову неперервності вектора електростатичної індукції на границі поділу діелектрика з напівпровідником[12]

$$\varepsilon_0 \varepsilon_d E_d = \varepsilon_0 \varepsilon_s E_s, \quad (1.2.4)$$

отримаємо

$$E_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s E_s}{\varepsilon_0 \varepsilon_d}. \quad (1.2.5)$$

Оскільки $\varepsilon_0 \varepsilon_s E_s = -Q_{sc}$, то падіння напруги на діелектрику можна представити в наступному вигляді[12]:

$$U_d = -\frac{Q_{sc} d}{\varepsilon_0 \varepsilon_d} = -\frac{Q_{sc}}{C_D}. \quad (1.2.5)$$

В реальних структурах на границі поділу діелектрик-напівпровідник в забороненій зоні завжди є дозволені поверхневі стани. Заряд на поверхні визначається ймовірністю заповнення їх електронами. Якщо в забороненій зоні напівпровідника є багато енергетичні рівні з енергією E_{ss} і густиною N_{ss} то заряд на поверхні визначається наступним співвідношенням[4]:

$$Q_{ss} = qN_{ss} \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{E_{ss}-F}{kT} - Y_s\right)}}. \quad (1.2.6)$$

Ємність обумовлена наявністю поверхневих станів і визначається[4]:

$$C_{ss} = \beta \frac{dQ_{ss}}{dY_s}. \quad (1.2.7)$$

Розглянемо зв'язок між напругою на затворі V_G МДН-структури і поверхневим потенціалом ψ_s . З умови електронейтральності маємо, що заряд на металевому електроді повинен дорівнювати сумі заряду в ОПЗ Q_{sc} , заряду поверхневих станів Q_{ss} , і вбудованому заряду в діелектрик Q_{ox} .

Тоді

$$-Q_M = Q_{sc} + Q_{ss} + Q_{ox}. \quad (1.2.8)$$

Згідно геометричної ємності діелектрика :

$$C_{ox} = \frac{Q_M}{V_{ox}}. \quad (1.2.10)$$

Звідси

$$V_{ox} = \frac{Q_M}{C_{ox}} = -\frac{Q_{sc}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}. \quad (1.2.11)$$

Враховуючи різницю робіт виходу між металом і напівпровідником, отримаємо[3] :

$$V_G = \Delta\varphi_{ms} + \psi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}. \quad (1.2.12)$$

Оскільки

$$Q_{ss} = -qN_{ss}(\psi_s - \varphi_0). \quad (1.2.14)$$

То підставивши в (1.2.12) отримаємо[3] :

$$V_G = \Delta\varphi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\varphi_0 + \psi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\psi_s. \quad (1.2.15)$$

Введемо нове позначення – напругу плоских зон V_{FB} :

$$V_{FB} = V_G(\psi_s = 0). \quad (1.2.16)$$

З урахуванням (1.2.16) з (1.2.15) отримаємо:

$$V_{FB} = \Delta\varphi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\varphi_0. \quad (1.2.17)$$

Таким чином зв'язок між напругою на затворі і поверхневим потенціалом задається у вигляді :

$$V_G = V_{FB} + \psi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\psi_s. \quad (1.2.18)$$

1.3 Порогова напруга МДН-приладів

Пороговою напругою МДН-транзистора з індукованим каналом прийнято вважати напругу на його затворі, при якій кількість носіїв у каналі стає рівною кількості основних носіїв у підкладці. При цьому поверхневий потенціал на межі розділу Si – SiO₂ рівний подвоєному значенню рівня Фермі у об'ємі напівпровідника.

Для того щоб визначити порогову напругу МДН-структури запишемо напругу на затворі для області сильної інверсії ($\psi_s > 2\varphi_0$). Заряд в ОПЗ від'ємний і складається з заряду іонізованих акцепторів Q_B і електронів Q_n в інверсному шарі. Таким чином маємо[4]:

$$V_G = \Delta\varphi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} - \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\varphi_0 - \frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\varphi_0 - \Delta\psi_s + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\Delta\psi_s + \frac{\varepsilon_0\varepsilon_s kT}{qL_D C_{ox}} e^{\frac{\beta\Delta\psi_s}{2}}. \quad (1.3.1)$$

де величина $\Delta\psi_s = \psi_s - 2\varphi_0$.

Введемо порогову напругу V_T як напругу на затворі, коли за рівноважних умов поверхневий потенціал дорівнює пороговому значенню $2\varphi_0$

$$V_T = V_{G(\psi_s=2\varphi_0)}. \quad (1.3.2)$$

З цього слідує :

$$V_T = \Delta\varphi_{ms} + 2\varphi_0 - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}2\varphi_0 - \frac{Q_B}{C_{ox}}. \quad (1.3.3)$$

Або за урахуванням V_{FB} :

$$V_T = V_{FB} + 2\varphi_0 + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}2\varphi_0 - \frac{Q_B}{C_{ox}}. \quad (1.3.3)$$

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МДН-СТРУКТУРИ ЗА ВФХ

2.1 Ємність плоских зон

Ємність плоских зон є дуже важливим параметром МДН-структури який вимірюються з високочастотних ВФХ даної структури.

Ємність плоских зон характеризує наступний вираз[10]:

$$C_{FB} = \frac{C_{ox}C_{sc}(0)}{C_{ox}+C_{sc}(0)}. \quad (2.1.1)$$

де C_{ox} – виміряна ємність за умови сильного збагачення, $C_{sc}(0)$ – ємність диференціальної ємності напівпровідника за умови плоских зон

Звідси [10]:

$$C_{sc}(0) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{L_D} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s q N_A}{kT/q}}. \quad (2.1.2)$$

Таким чином вимірявши за допомогою ВФХ ємність C_{ox} , ми можемо отримати ємність напівпровідника. А знаючи параметри напівпровідника і умови при яких проводилися виміри можемо визначити рівень легування напівпровідника за наступним виразом:

$$N_A = \frac{kTC_{FB}^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_s q^2}. \quad (2.1.3)$$

Також, якщо визначити за допомогою класичного методу концентрацію носіїв заряду, то можливо визначити діелектричну проникність даного напівпровідника.

Визначити ємність плоских зон можливо декількома способам. Це можливо зробити за допомогою теоретичних кривих використовуючи дані з ВФХ даної МДН структури.

Для цього скористаємося наступними теоретичними кривими:

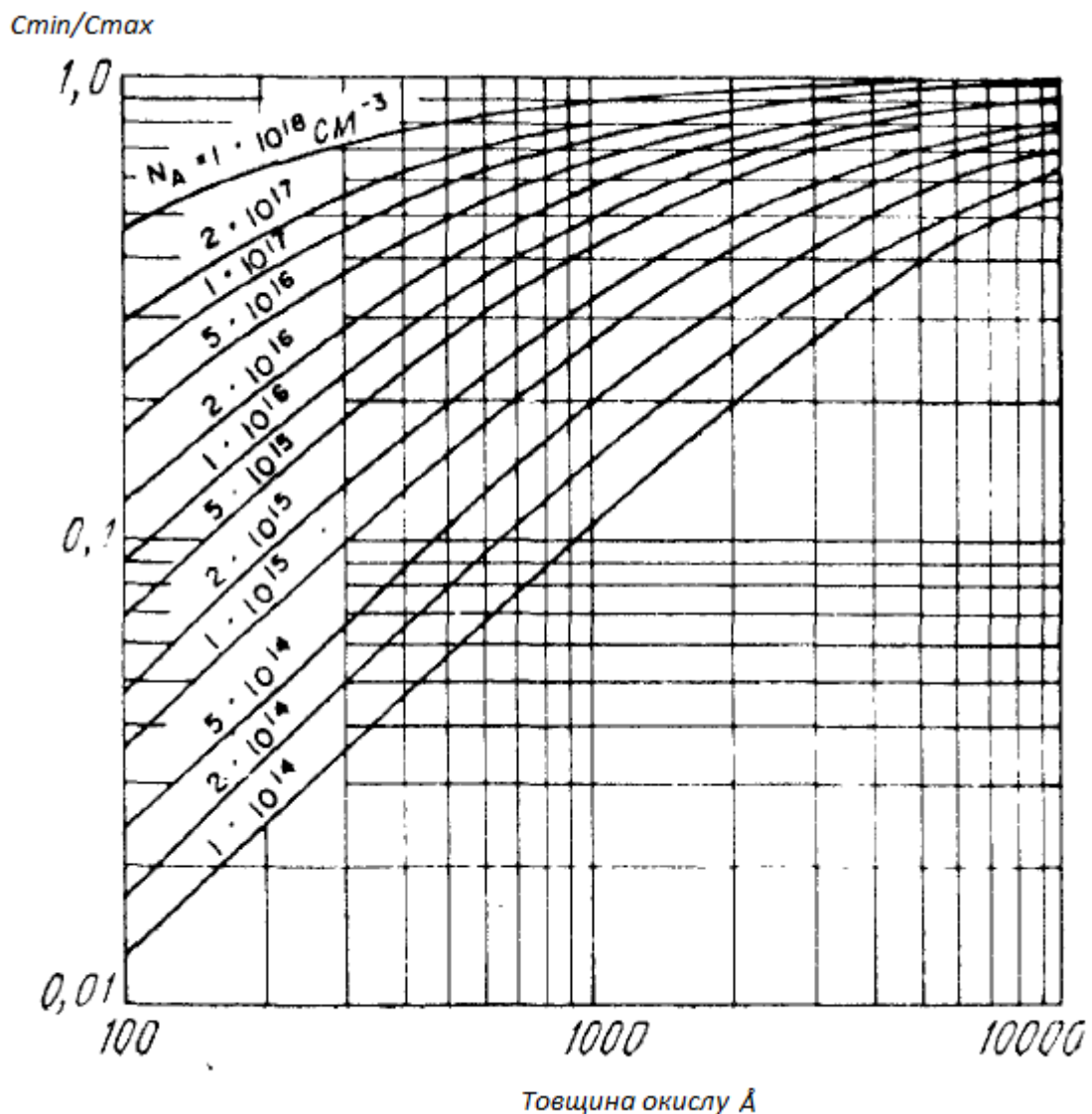


Рисунок 2.1.1 Залежність нормованої високочастотної ємності від товщини шару для ідеальної МДН-структури[1]

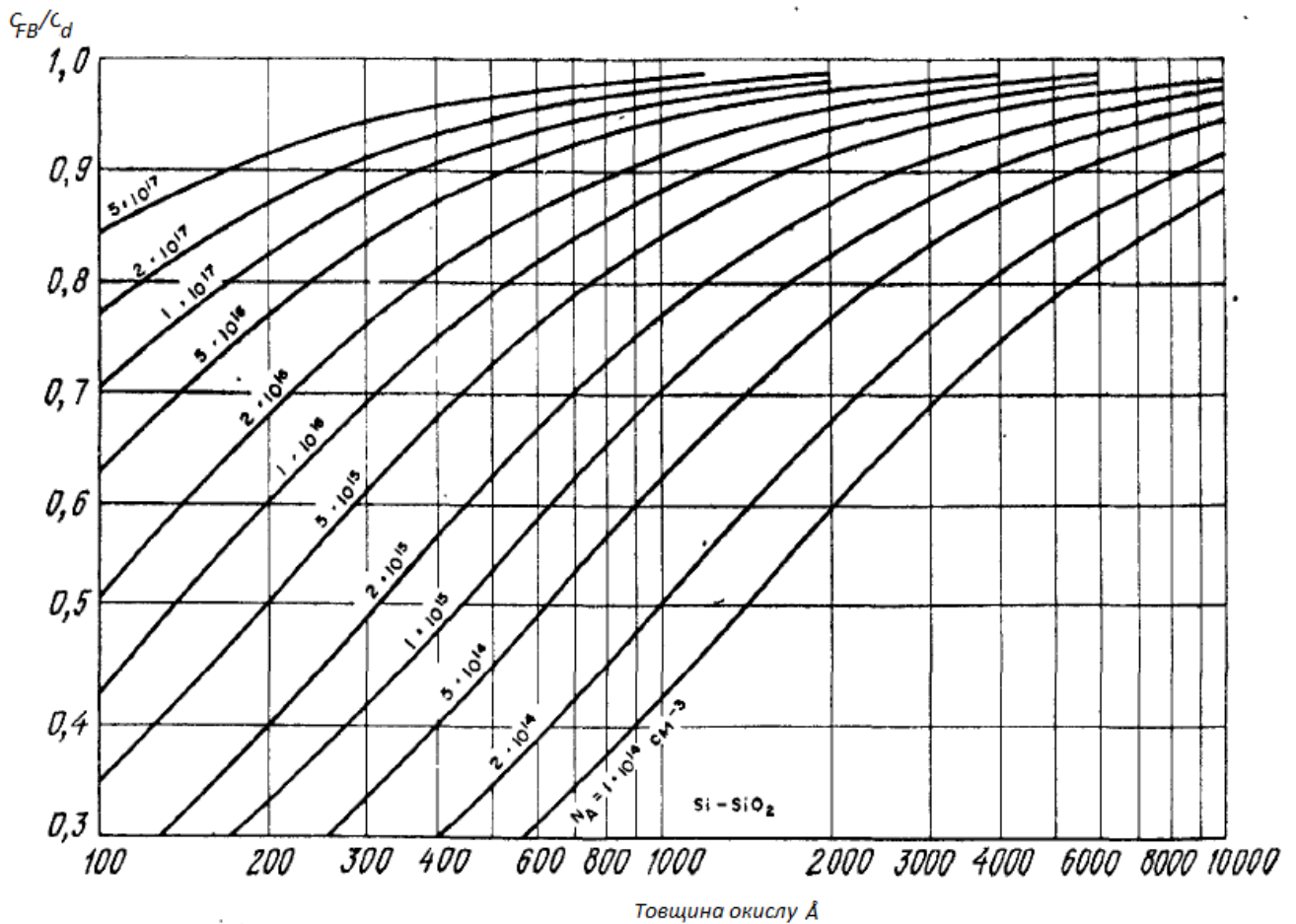


Рисунок 2.1.2 Залежність ємності плоских зон від товщини шару для ідеальної МДН-структури[1]

Таким чином, для визначення ємності плоских зон спочатку визначаємо відношення мінімальної ємності до максимальної з експериментальної ВФХ МДН-структури.

Так як в режимі сильної інверсії ємність не залежить від напруги на затворі і визначається ємністю діелектрика і ступеню легування напівпровідника. Таким чином з ВФХ знайдемо ємність діелектрика та його товщину за формулою:

$$C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d S}{d}. \quad (2.1.4)$$

Далі, провівши перпендикулярні прямі, з графіку (2.1.1) визначимо рівень легування підкладки. З графіку (2.1.2) використовуючи рівень легування і товщину діелектричної підкладки, зможемо знайти відношення ємності плоских зон до ємності діелектрика $\frac{C_{FB}}{C_D}$. Так як ємність діелектрика відома, можливо визначити ємність плоских зон.

Головним недоліком даного методу є необхідність знати всі параметри структур, що задіяні в вимірах, а також зовнішні параметри при яких були проведені виміри. У випадку коли дані параметри були виміряні не досить точно, а зовнішні параметри не відповідали стандартним, то параметри будуть визначені з великою похибкою.

2.2 Напруга плоских зон

Точне визначення напру плоских зон дуже важливе для знаходження ефективної роботи виходу, і вплину на порогову напругу МДН-приладів.

У рівноважному стані контактний потенціал між металевим електродом і напівпровідниковою підкладкою МДН-структури залежить тільки від матеріалів затвору і підкладки. Цей контактний потенціал задається робочою функцією затвору і підкладки. Для ненульового потенціалу на затворі і напівпровіднику індують ся заряди[9].

Прикладаючи зовнішній потенціал до затвору, протилежний до потенціалу затвору, ефект різниці робочих функцій врівноважується і одержується нульовий потенціал усередині напівпровідника (режим плоских зон) як показано на рисунку (2.2.1). Така напруга називається напругою плоских зон[9].

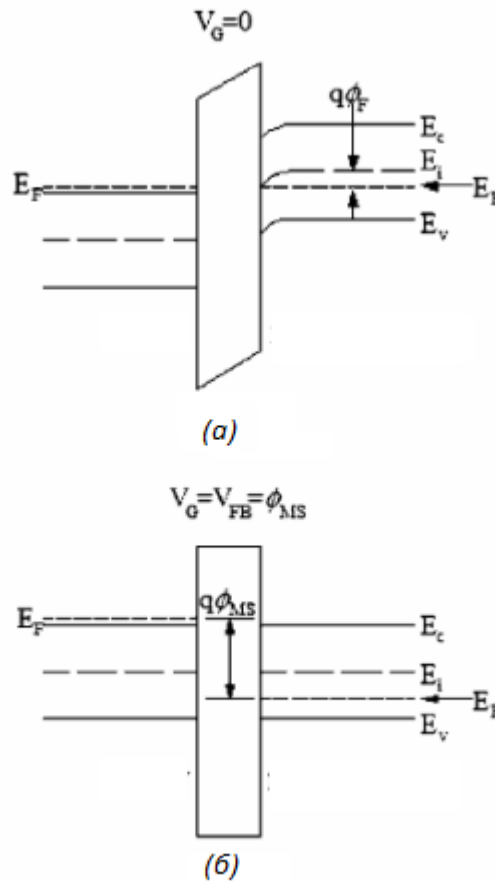


Рисунок 2.2.1 Енергетичні діаграми МДН-структури а) при нульовому потенціалі на затворі, б) при режимі плоских зон[9]

Існування заряду всередині діелектрика і на границі поділу діелектрик-напівпровідник індукує заряд при нульовому зміщенні. Потенціал в середні діелектрика має вигляд :

$$V_{ox} = -\frac{Q_{ox}}{C_{ox}}. \quad (2.2.1)$$

Враховуючи різницю робіт виходу і заряду в оксиді, отримаємо вираз для напруги плоских зон:

$$V_{FB} = \Delta\phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}. \quad (2.2.2)$$

Даний вираз відповідає ідеальній системі, а ВФХ такої системи має наступний вигляд:

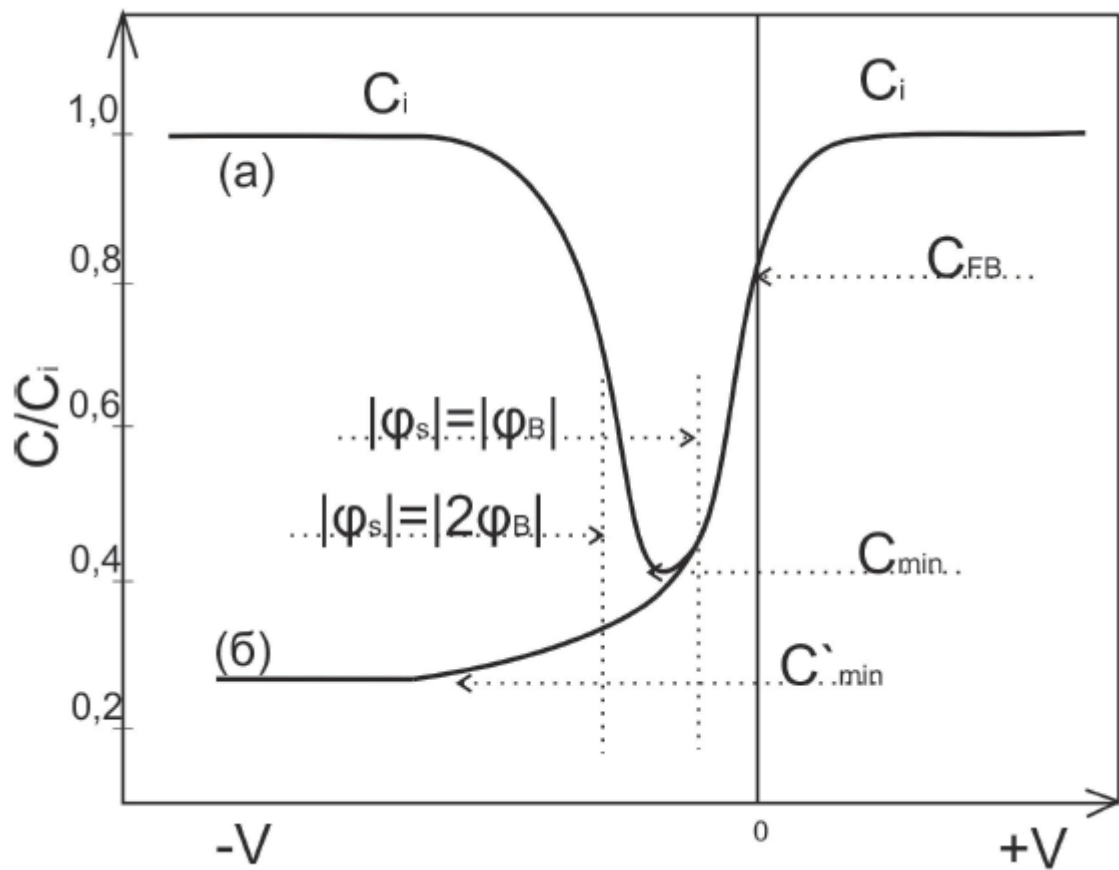


Рис. 2.1.2 а) низькочастотна, б) високочастотна ВФХ ідеальної МДН-структури.

В реальних МДН-структурах враховується вплив поверхневих станів, і вираз для напруги плоских зон набуває наступного вигляду:

$$V_{FB} = \Delta\phi_{ms} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}}\phi_F. \quad (2.2.3)$$

А ВФХ зміститься відносно ідеальної:

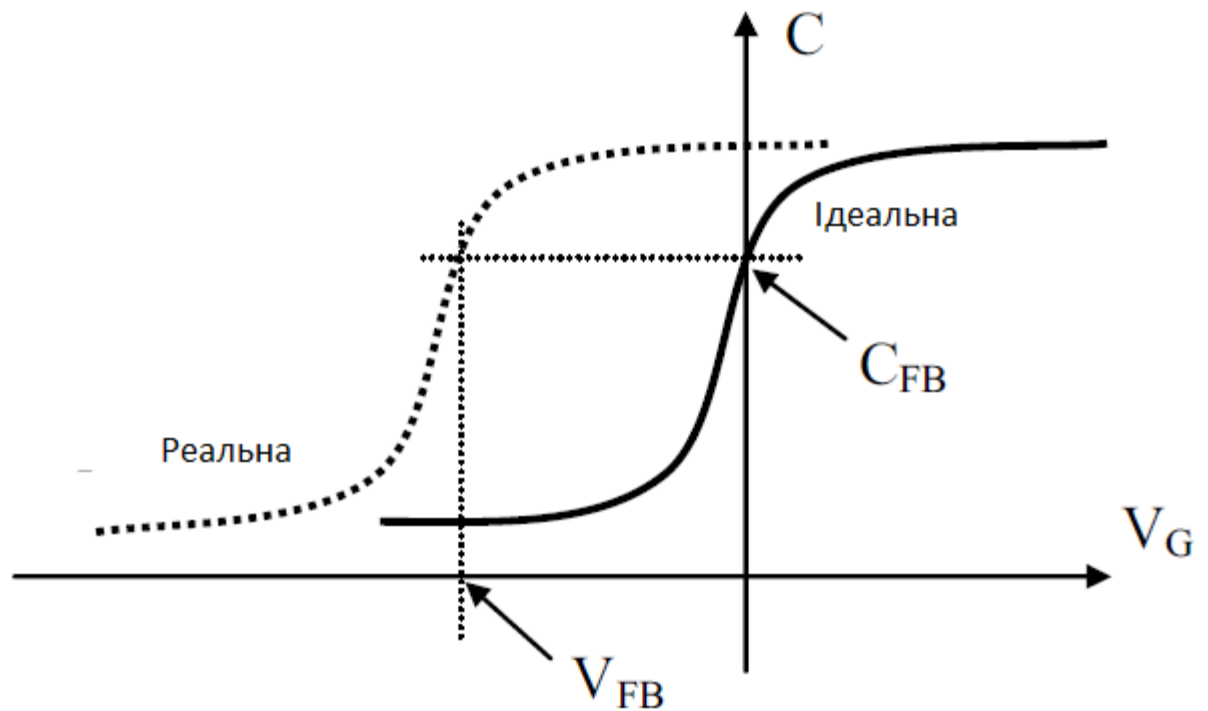


Рис 2.2.3. Високочастотна ВФХ реальної МДН-структури.

Як можна бачити з виразу (2.2.3) при дуже малих ємкостях діелектрика (дуже тонкому шарі) напругу плоских зон можна використовувати для визначення роботи виходу. Таким чином вираз (2.2.3) трансформується наступним чином:

$$V_{FB} \cong \Delta\phi_{ms}. \quad (2.2.4)$$

Також зміна порогової напруги ΔV_{FB} , є мірою яка характеризує наявність і величину заряду поверхневих станів на границі поділу між діелектриком і напівпровідником. Таким чином, проводячи виміри порогової напруги після технологічних операцій при виготовленні структури, ми можемо дізнатися про якість її виготовлення.

Напругу плоских зон можливо визначити з ВФХ провівши лінію паралельно осі абсцис, що дорівнює величині ємності плоских зон, та опустивши

перпендикуляр на вісь напруги. Ємність плоских зон можливо визначити за допомогою теоретичних кривих, як було описано вище.

2.3 Порогова напруга

При деякому потенціалі густина неосновних носіїв на границі поділу порівнюється з густиною основних носіїв в підкладці $n(\psi_s) = N_A$. Цей потенціал відповідає початку режиму, який називається режимом сильної інверсії:

$$\psi_s(inv) = 2\varphi_F = 2\varphi_F \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right). \quad (2.3.1)$$

а відповідна напруга – пороговою напругою:

$$V_T = V_{FB} + 2\varphi_0 + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}} 2\varphi_0 - \frac{Q_B}{C_{ox}}. \quad (2.3.2)$$

Порогова напруга, є одним з найважливіших параметрів приладів на основі МДН-структури. Так в МДН-транзисторах, цей параметри відповідає напрузі, при якій починає виникати канал. Таким чином визначення точного значення порогової напруги є дуже важливим.

Для того щоб визначити дану величину за ВФХ потрібно провести дотичну до графіку, а точку перетину з мінімальною ємністю екстраполювати на вісь напруги, таким чином отримаємо порогову напругу даного зразка.

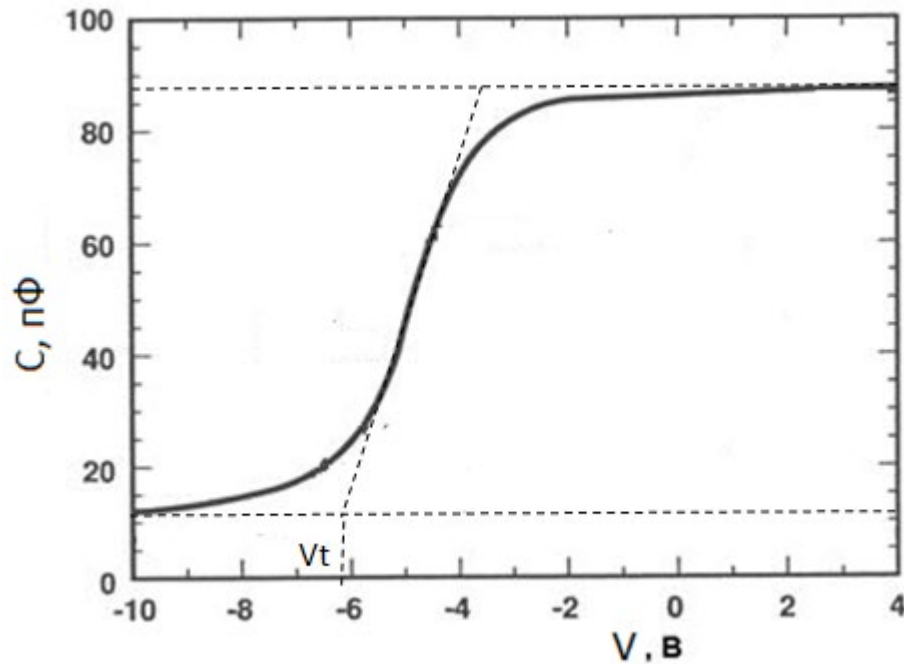


Рис. 2.3.1 Визначення порогової напруги за ВФХ.

2.4 Щільність поверхневих станів

В шарі окислу реальної МДН-структури існує фіксований поверхневий заряд. Виміряні C - V характеристики відрізняються від характеристик ідеальної МДН-структури через наявність в під затворному діелектрику рухомих іонів і іонізованих пасток, які створюють поверхневий заряд. Так як поверхневий заряд залежить від орієнтації напівпровідника, окислення, то поверхневий потенціал дуже важливий при оцінці плівки. Поверхневий заряд може бути розрахований за наступним виразом[1]:

$$Q_{ss} = C_{ox} U_{ss}, \quad (2.4.1)$$

де U_{ss} —потенціал поверхневих станів, що відповідає:

$$U_{ss} = U_{FB} - \varphi_{ms}, \quad (2.4.2)$$

Таким чином густину поверхневих станів можна розрахувати з наступного співвідношення:

$$N_{ss} = \frac{Q_{ss}}{q}, \quad (2.4.2)$$

2.5 Експериментальні розрахунки

Для прикладу розрахуємо параметри МДН-структури за дослідженими експериментальними кривими.

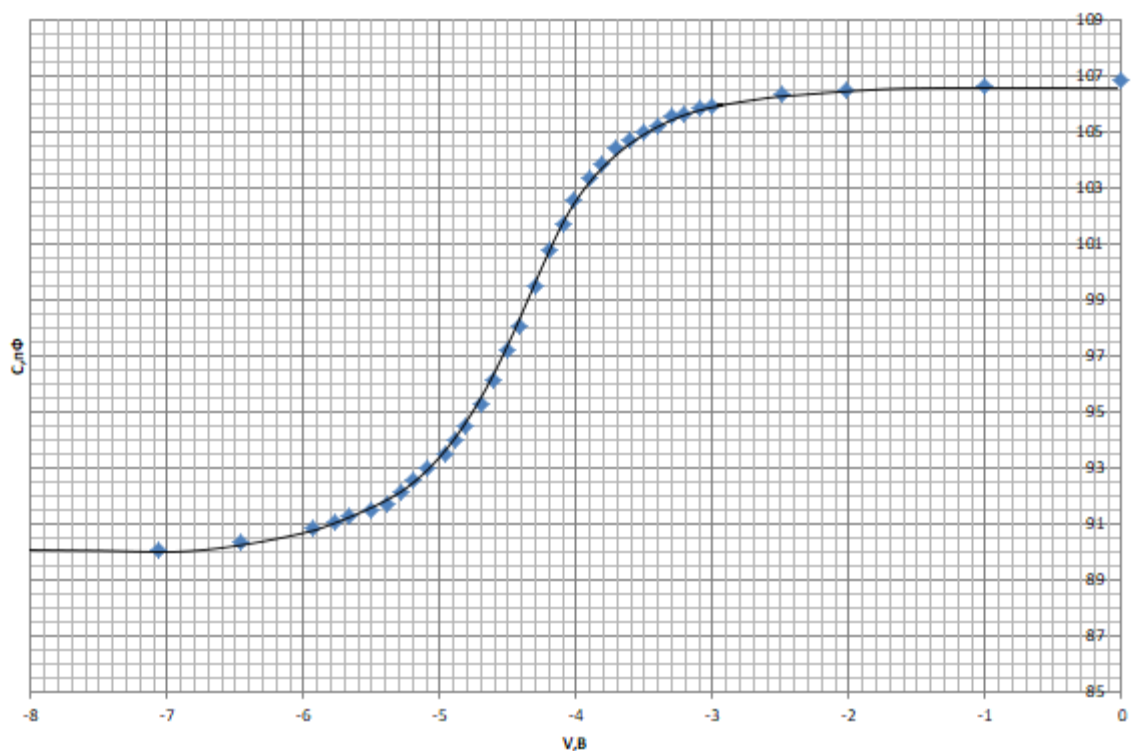


Рисунок 2.5.1 Експериментальна ВФХ МДН-структури

Спочатку, провівши паралельні лінії осі напруг визначимо мінімальне і максимальне значення на кривій. Так отримаємо наступні дані:

$$\begin{aligned} C_{min} &= 90.05 \text{ пФ}, \\ C_{max} &= 106,85 \text{ пФ}. \end{aligned} \quad (2.5.1)$$

Так як в області збагачення вклад ємності напівпровідника в загальну ємність незначний, то можна сказати, що верхня сходинка ВФХ наближено дорівнює ємності діелектрика :

$$C_{max} \cong C_{ox}. \quad (2.5.2)$$

Для того, щоб знайти товщину діелектричного шару скористаємося рівнянням для ємності діелектрика:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d S}{d}, \quad (2.5.3)$$

Тоді для товщини шару отримаємо наступні значення:

$$d = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.9 \cdot 3,018 \cdot 10^{-7}}{106.85 \cdot 10^{-12}} = 0.10023 \text{ мкм}, \quad (2.5.4)$$

Далі знайдемо відношення мінімальної ємності до максимальної:

$$\frac{C_{min}}{C_{max}} = 0.843. \quad (2.5.5)$$

Таким чином, з графіку на рисунку (2.1.1) можемо визначити концентрацію домішків у структурі:

$$N_A = 5 * 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (2.5.6)$$

Використовуючи значення концентрації домішків і товщину діелектрика за допомогою рисунка (2.1.2) знайдемо відношення ємності плоских зон до ємності діелектрика:

$$\frac{C_{FB}}{C_{max}} = 0.98. \quad (2.5.7)$$

З цього ємність плоских зон буде дорівнювати :

$$C_{FB} = 104,71 \text{ пФ}. \quad (2.5.8)$$

Провівши дану ємність на експериментальну криву отримаємо напругу плоских зон.

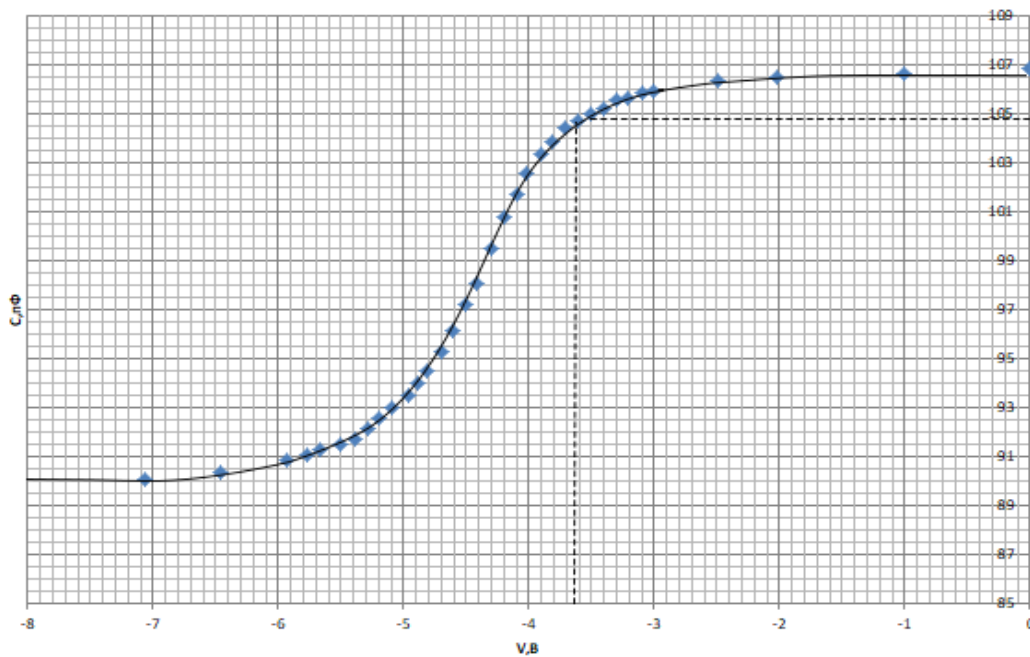


Рисунок 2.5.2 Визначення напруги плоских зон по експериментальним кривим

$$U_{FB} = -3,65 \text{ В}. \quad (2.5.9)$$

Знайдемо напругу поверхневих станів:

$$U_{ss} = U_{FB} - \varphi_{ms} = -3.65 + 0.5 = -3.15 \text{ В.} \quad (2.5.10)$$

Заряд поверхневих станів знайдемо за формулою:

$$Q_{ss} = U_{ss} C_{ox} = -0.1114 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2}. \quad (2.5.11)$$

Тоді густина поверхневих станів:

$$N_{ss} = \frac{Q_{ss}}{q} = 0.6967 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{см}^2}. \quad (2.5.12)$$

Проведемо аналогічні розрахунки для іншої кривої:

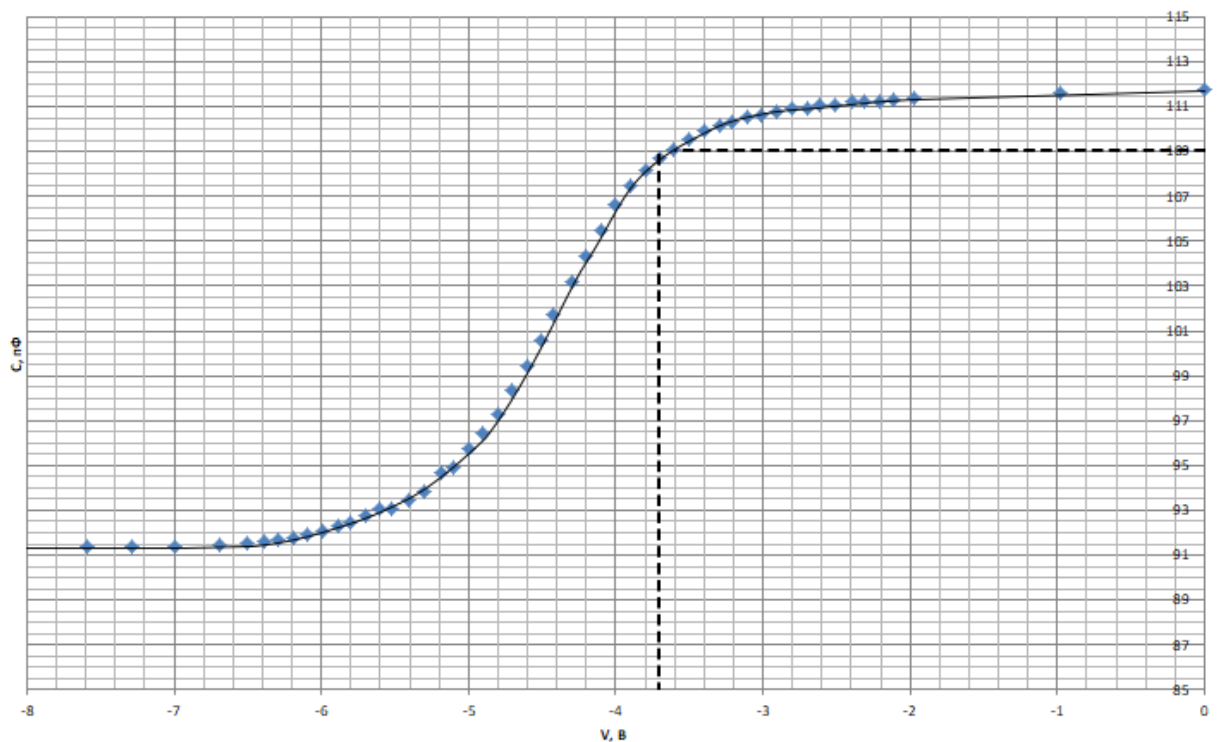


Рисунок 2.5.3 Експериментальна ВФХ

$$\begin{aligned}
C_{min} &= 91,4 \text{ пФ}, \\
C_{max} &= 111,75 \text{ пФ}. \\
d &= 0.09563 \text{ мкм} \\
\frac{C_{min}}{C_{max}} &= 0,817 \\
N_A &= 2 * 10^{17} \text{ см}^{-3} \\
\frac{C_{FB}}{C_{max}} &= 0.975 \\
C_{FB} &= 109 \text{ пФ}, \\
U_{FB} &= -3,7 \text{ В} \\
U_{ss} &= -3,2 \text{ В} \\
Q_{ss} &= -0.1184 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Кл}}{\text{см}^2} \\
N_{ss} &= 0.74 \cdot 10^{-12} \frac{1}{\text{см}^2}
\end{aligned} \tag{2.5.13}$$

Під час експерименту була досліджена МДН-структура на підкладці КЕФ-3, з поверхневим питомим опором $\rho = 3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для подальшого порівняння розрахуємо концентрацію донорів в даній підкладці за рівнянням:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}. \tag{2.5.14}$$

Тоді концентрація для даної підкладки буде дорівнювати:

$$N_D = 1,39 * 10^{17} \text{ см}^{-3}. \tag{2.5.15}$$

Як можна бачити з отриманих результатів даний метод не є досить точним. Так як при розрахунках потрібно використовувати велику кількість теоретичних

даних, тому неточність у визначенні умов при яких проводилися умови призводять до неточностей у вихідних результатах.

3.ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ НА ВФХ

3.1 Трьохконденсаторна модель МДН-структури

Численні теоретичні та експериментальні дослідження і масова практика напівпровідникового приладобудування встановили і підтвердили сильну залежність властивостей і поведінки напівпровідникових об'єктів, приладів і пристроїв від стану, методів обробки та умов існування поверхні напівпровідника. Це пов'язано з тим, що в переважній більшості сучасних пристроїв напівпровідникової мікроелектроніки активно діючої областю приладу, як правило, є дуже тонкий шар напівпровідника, приповерхнева область або межа двох середовищ[8].

Ці особливості обумовлені існуванням дозволених електронних станів - поверхневих станів (ПС) в околиці поверхні, в забороненій зоні напівпровідника, подібно локальним домішковим станам в обсязі кристала - донорам і акцепторам.

Порівнюючи локальні поверхневі і об'ємні домішкові стани, слід зазначити ще одну особливість ПС. Поверхневі стани, що походять з незаповненої зони (зони провідності), в нейтральному стані не містять електрона, а, захопивши його, стають негативно зарядженими, тобто поведуться подібно акцепторним домішковим рівням в обсязі напівпровідника, хоча і розташовані у верхній половині зони, відповідно рівні, що походять із заповненої зони, в нейтральному стані містять електрон, який при порушенні може перейти в зону провідності, залишаючи на поверхневому донорі нерухомий позитивний заряд. Поверхневі донори розташовуються в нижній половині забороненої зони на поверхні[8].

У технологічному циклі обробки поверхні напівпровідників ми маємо справу зі складними багатопараметричними процесами, інтерпретувати які досить складно, так як в кожному конкретному випадку виходять різні поверхневі фази.

Поряд з можливим проявом власних поверхневих станів сильним є вплив навколишнього газового середовища, оскільки відсутні умови надвисокого

вакууму. Адсорбція призводить як до появи шару адсорбату на активній поверхні напівпровідника, що сильно змінює все поверхневі властивості напівпровідника, так і до утворення стійкого окисного шару. Зазвичай "повільними" вважаються стани, розташовані на зовнішній поверхні оксиду, а "швидкими" - стани, розташовані на кордоні кристал - оксид. У технологічних циклах обробки поверхні, де присутній термічний вплив, спостерігається зміна характеру розподілу домішок на поверхні[8].

Будь-яка реальна поверхня має дефекти. Відрізняються такі їх види. Макродефекти - це порушення періодичної структури, що охоплюють області, які значно перевищують за своїми розмірами постійну решітку. До них відносяться:

- 1) тріщини в поверхні, пори, сходинок, дислокації;
- 2) макроскопічні включення сторонніх атомів і ін.

Мікродефеки - це порушення того ж розміру, що і постійна решітки. До них відносяться:

- 1) порожній вузол (вакансія), утворений в результаті видалення з поверхневого шару решітки атомів або іона;
 - 2) атом або іон решітки, викинутий на поверхню;
 - 3) чужорідний атом або іон, що знаходиться на поверхні або впроваджений в міжвузловий простір в поверхневому шарі;
 - 4) чужорідний атом або іон, що заміщає власний атом в поверхневому шарі.
- Дефекти та домішки на поверхні кристала призводять до утворення ПС, які називають невластими станами.

Частинки, хемобсорбоване на поверхні, також можуть розглядатися як дефекти поверхні, так як їх наявність порушує періодичну структуру поверхні. Хемобсорбційна частка здатна захопити вільний електрон або вільну дірку, переходячи з електрично нейтрального стану в заряджений.

При цьому захоплені електрон або дірка залучаються до участі в хемобсорбційному зв'язку.

Якщо ідеальну поверхню кристала можна визначити як кристалографічну площину, на якій атоми розподілені так само, як і на відповідних площинах в

обсязі, то поняття дійсної поверхні (яка виходить експериментально) є складним і різко відрізняється від поняття ідеальної поверхні[6].

Будемо розділяти дійсні поверхні напівпровідника на наступні групи[9]:

1) атомарному-чисті поверхні, створювані в надвисокому вакуумі випаровуванням поверхневих забруднень, сколюванням кристала, іонним бомбардуванням і іншими методами;

2) реальні поверхні, одержувані в процесі обробки поверхні - шліфування, полірування, хімічного або електрохімічного травлення і т.п. Такі поверхні містять достатню кількість домішок і забруднень за рахунок обробки в хімічних реактивах, а також в результаті адсорбції газів, що оточують кристал. Серед реальних поверхонь слід розрізняти дві підгрупи:

а) свіжоприготовлені (протруєні) реальні поверхні і

б) витримані (стабілізовані старінням) реальні поверхні.

Такий поділ викликаний тим, що навіть в нормальних кімнатних умовах зміна структури і складу поверхні призводить до значного розбіжності станів свіжоприготовлених і стабілізованих старінням поверхонь напівпровідника;

3) поверхня (межа) розділу між двома твердими фазами, що утворюється в результаті тривалої обробки поверхні кристала в відповідних середовищах, в процесі нанесення на неї різних плівок.

Одним з найбільш розповсюджених методів вивчення властивостей структур метал-діелектрик-напівпровідник є метод, заснований на аналізі залежності ємності МДН-структури від напруги на затворі, метод вольт-фарадних характеристик. Розглянемо теорію ємності МДН-структури. Відповідно до означення ємності[4]:

$$C = \frac{\partial Q_m}{\partial V_G}. \quad (3.1.1)$$

Використовуючи вирази для заряду на затворі і падіння напруги на діелектрику, отримаємо[4]:

$$C = C_{ox} \left(1 - \frac{\partial \psi_s}{\partial V_G} \right). \quad (3.1.2)$$

Таким чином, залежність ємності МДН-структури від напруги буду визначатися раніше отриманою залежністю $\psi_s(V_G)$. Також можна сказати, що в області сильної інверсії і насичення ємність буде слабко залежати від величини V_G . Загальна залежність ємності від напруги буду мати вигляд кривої з ярко вираженим мінімум[4].

Використовуючи вираз (1.2.15) і продиференціюючи по ψ_s отримаємо наступний вираз

$$\frac{d\psi_s}{dV_G} = 1 + \frac{C_{sc}}{C_{ox}} + \frac{C_{ss}}{C_{ox}}. \quad (3.1.3)$$

Підставивши (3.1.3) в (3.1.2) отримаємо:

$$C = C_{ox} \left(1 - \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{sc} + C_{ss}} \right). \quad (3.1.4)$$

або

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{sc} + C_{ss}}. \quad (3.1.5)$$

Дане співвідношення дозволяє нам побудувати еквівалентну схему МДН-структури, представивши її як послідовно з'єднану ємність діелектрика C_{ox} з паралельно з'єднаними ємністю ОПЗ C_{sc} і ємністю поверхневих станів C_{ss} [8].

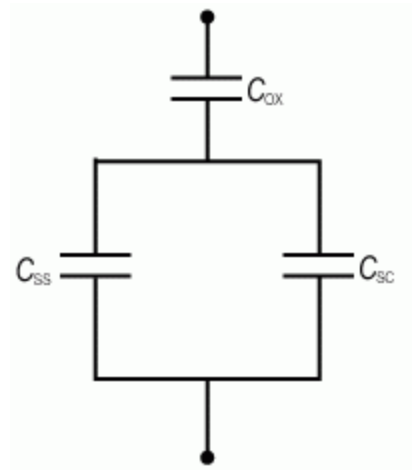


Рисунок 3.1.1 Еквівалентна схема МДН-структури

3.2 Особливості ВФХ в околі напруги плоских зон

Розглянемо кожну з зон ВФХ МДН-структури.

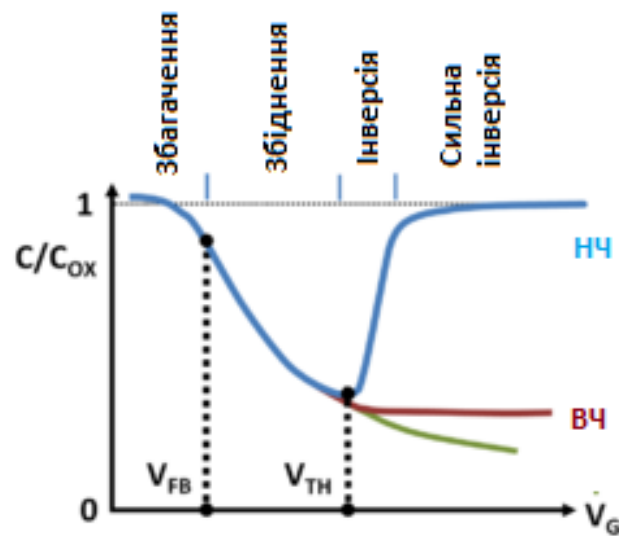


Рисунок 3.2.1. ВФХ МДН-структури

Режим збагачення. Припустимо, що напруга на затворі є такою, що $V_{g0} = V_g - V_{FB}$ є негативною. Ця негативна напруга на затворі створює електричне поле E_{ox} що впливає на електрод як показано на рис 3.2.2.

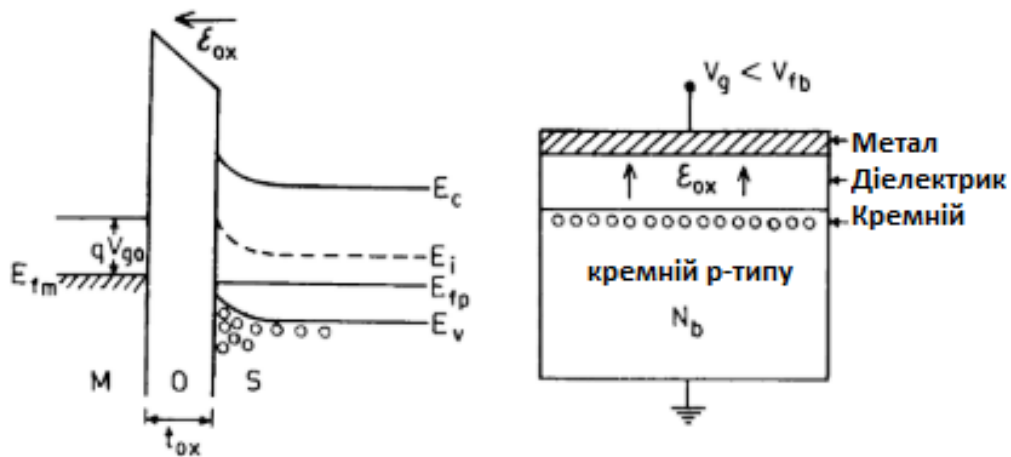


Рисунок 3.2.2 Режим збагачення[5]

Оскільки прикладена негативна напруга пригнічує електростатичний потенціал металу щодо підкладки, енергія електронів підіймається відносно субстрату. В результаті рівень Фермі в металі лежить вище рівноваги на величину qV_{g0} . Переміщення рівня Фермі викликає згинання зони провідності вгору, що відповідає напрямку E_{ox} [5].

З точки зору заряду $V_{g0} < 0$ призводить до негативного заряду на затворі. Це в свою чергу індукує позитивний заряд на поверхні кремнію. Такий позитивний заряд у напівпровіднику р-типу означає надлишкову концентрацію дірок на поверхні. Оскільки надлишкові дірки накопичуються на поверхні даний режим називається режимом накопичення[5].

$$\begin{cases} V_g < V_{FB}, \\ \psi_s < 0, \\ Q_s > 0. \end{cases} \quad (3.2.1)$$

Режим збіднення. Тепер розглянемо випадок коли напруга на затворі $V_{g0} = V_g - V_{FB}$ позитивна цьому $V_g > V_{FB}$. Ця напруга створює електричне поле яке направлене від затвору до підкладки як показано на рисунку 3.2.3.

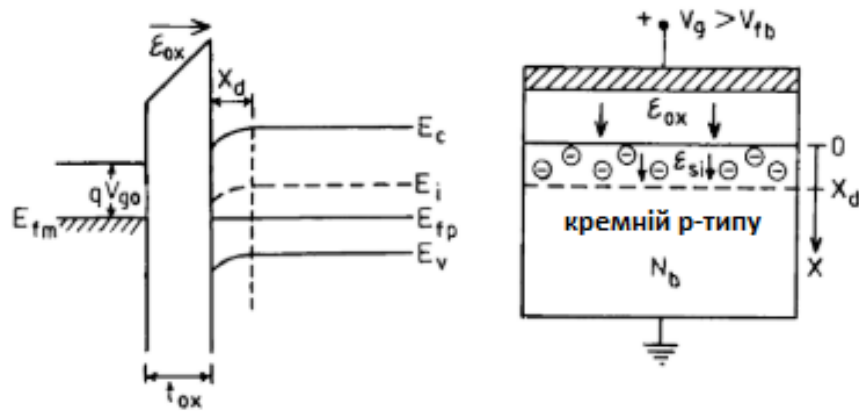


Рис. 3.2.3 Режим збіднення[5]

Позитивна напруга підвищує потенціал на затворі, тим самим знижуючи рівень Фермі. Переміщення рівня енергії вниз викликає вигин смуги вниз в зоні провідності, що узгоджений з напрямком енергії.

Позитивна напруга на затворі створює заряд, який в свою чергу відштовхує дірки від поверхні кремнію і таким чином захоплює негативно заряджені акцепторні іони. Іншими словами, позитивний заряд на затворі індукує негативний заряд на поверхні кремнію[5].

$$\begin{cases} V_g > V_{FB}, \\ \psi_s > 0, \\ Q_s < 0. \end{cases} \quad (3.2.2)$$

Режим інверсії. Якщо ми продовжимо збільшувати позитивну напругу на затворі, вигин смуги буде збільшуватися ще більше. Досить велика напруга може викликати такий вигин смуги, що енергія середини може перетнути рівень Фермі. При цьому поверхня поводить себе подібно до матеріалу n-типу як показано на рисунку 3.2.3.

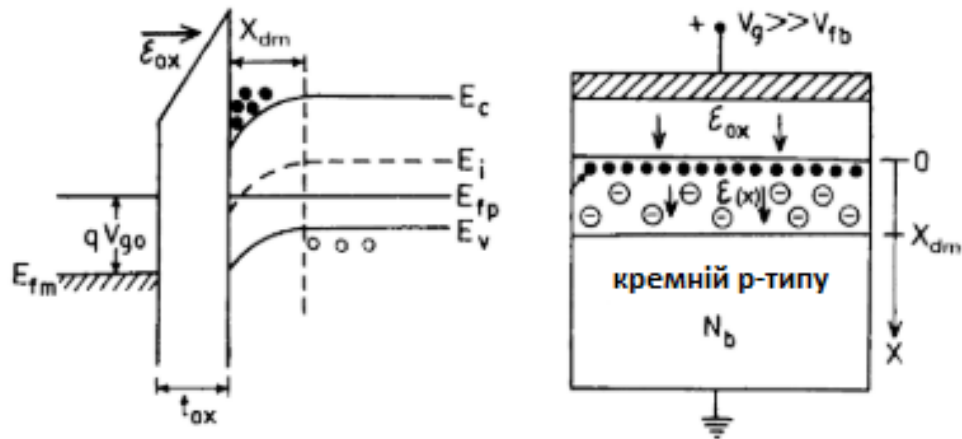


Рис. 3.2.3. Режим інверсії[5].

Поверхня інвертується коли $E_f > E_i$. Це називається режимом слабкої інверсії, коли рівень Фермі значно більший – режим сильної інверсії.

Далі детальніше розглянемо напругу і ємність в режимі збіднення. У міру того як негативна напруга достатньо зменшиться, так що $V_g > V_{FB}$, виснажується область шириною W поблизу поверхні кремнію. Ця область діє як послідовний діелектрик з окислом. Ємність ОПЗ в даній області обумовлена ємністю іонізованих акцепторів C_B .

$$C_{sc} = C_B = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 q N_A}{2 \left(\psi_s - \frac{kT}{q} \right)}} \quad (3.2.3)$$

Ємність в області збіднення слабо залежить від поверхневого потенціалу, зменшуючись з збільшенням останнього. Мінімальне значення ємності C_{sc} досягається поблизу порогового значення поверхневого потенціалу.

Ємність ОПЗ в області слабкої інверсії і збіднення еквівалентна ємності плоского конденсатора, що заповнена діелектриком з відносною діелектричною проникністю ϵ_s пластини якого знаходяться друг від друга на відстані W .

$$C_{sc} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{W} \quad (3.2.4)$$

Відношення (3.2.4) несправедливе при умові $\psi_s \rightarrow 0$, тобто в області плоских зон у поверхні напівпровідника. Для розрахунку ємності плоских зон отримаємо вираз :

$$C_{FB} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{L_D} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s q N_A}{kT/q}}. \quad (3.2.5)$$

Для заряду в області збіднення отримаємо вираз :

$$Q_B = Q_B^* + C_B^* (\psi_s - \varphi_0), \quad (3.2.6)$$

де Q_B^* і C_B^* - величина заряду і ємності іонізованих акцепторів за умови $\psi_s = \varphi_0$.
Тоді для потенціалу отримаємо:

$$V_G - V_{FB} = n\psi_s, \quad (3.2.7)$$

де

$$n = 1 + \frac{qN_{ss}}{C_{ox}} + \frac{C_B^*}{C_{ox}}, \quad (3.2.8)$$

Із відношення (3.2.7) видно, що в області збіднення і слабкої інверсії залежність потенціалу ψ_s від напруги V_G є лінійною.

3.3. Розрахунок напруги плоских зон МДН-структури за ВФХ.

Для того щоб дослідити вплив заряду поверхневих станів на вольт-фарадну характеристику МДН-структури, необхідно визначити повну ємність МДН-структури та її залежність від напруги на затворі. Для цього необхідно в рівняння трьохконденсаторної моделі МДН-структури підставити рівняння для ємностей діелектрика, поверхневих станів і області просторового заряду. Так як дане рівняння в явному вигляді дуже складне то воно потребує подальшого спрощення.

Так як ємність діелектрика не залежить від напруги на затворі, її можна визначити опираючись на експериментальні ВФХ МДН-структури, це ємність що дорівнює верхній сходинці на ВФХ. Так як дану ємність дуже легко визначити, то потрібно аналізувати ВФХ не як трьохконденсаторну систему, а тільки як з'єднання двох паралельних ємностей, ємності області просторового заряду і ємності, що обумовлена зарядом на поверхні поділу діелектрик-напівпровідник. Таким чином отримаємо наступне рівняння :

$$C_s = C_{sc} + C_{ss}, \quad (3.3.1)$$

Так як заряд поверхневих станів найбільше впливає на загальну ємність МДН-структури тільки в області збіднення і слабкої інверсії, тоді розглянемо тільки ці області. В області збіднення ємність області просторового заряду можна записати (3.2.5), а напруга буде мати вигляд (3.2.7). Підставивши (3.2.7) в (3.2.5) отримаємо залежність ємності від напруги на затворі :

$$C_{sc}^{FB+} = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 q N_A}{2((V_G - V_{FB})n^{-1} - k_B T/q)}} \quad (3.3.2)$$

Проаналізувавши дане співвідношення, можна сказати, що в координатах $(C_{sc}^{FB+})^2(V)$, дана залежність буде вести себе лінійно, крім того, дотична від неї на вісь напруг, дасть можливість знайти напругу плоских зон МДН структури.

$$V_{FB} = V_G - \frac{kT}{q}n. \quad (3.3.3)$$

Напругу плоских зон можна визначити з точністю до множника $\frac{kT}{q}n$. Знаючи параметри матеріалів і умов досліду параметр n можливо розрахувати ще точніше.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВФХ КРЕМНІЄВИХ МДН-СТРУКТУР

4.1 Експериментальне дослідження кремнієвих МДН-структур

Дослідна установка для вимірювання вольт-фарадних характеристик МДН-структур представлена на рис.4.1.1, де:

- 1 - електропідігрівач;
- 2 - вилка для ввімкнення електропідігрівача в мережу при "вольт-температурних-випробуваннях";
- 3 - пластина із МДН-структурами;
- 4 - вимірювальний електрод;
- 5÷5' - виводи для під'єднання вимірювального стенду до блоку живлення;
- 6÷6' - виводи для під'єднання вимірювача добротності до вимірювального стенду;
- 7 - термометр;
- 8 - вимірювач добротності (Q-метр) ;
- 9 - блок живлення постійного струму ;
- 10 - вольтметр постійного струму.

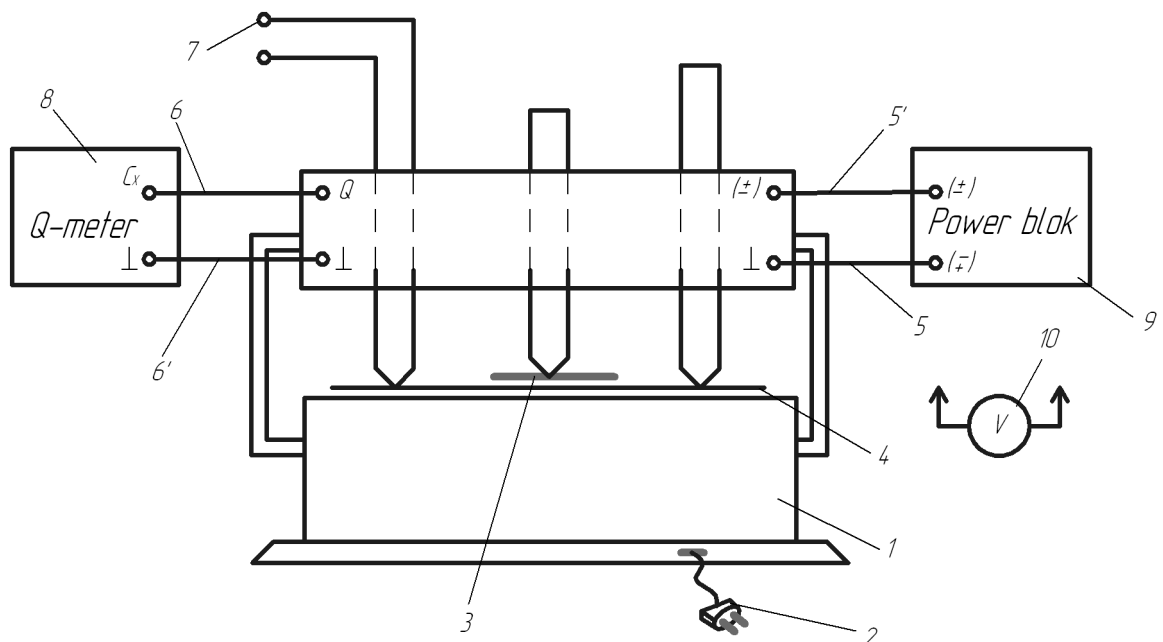


Рисунок 4.1.1 Дослідна установка для вимірювання ВФХ

Всі виміри були проведені за стандартних (кімнатних умов). Під час дослідження експериментальних характеристик було виміряно наступні криві:

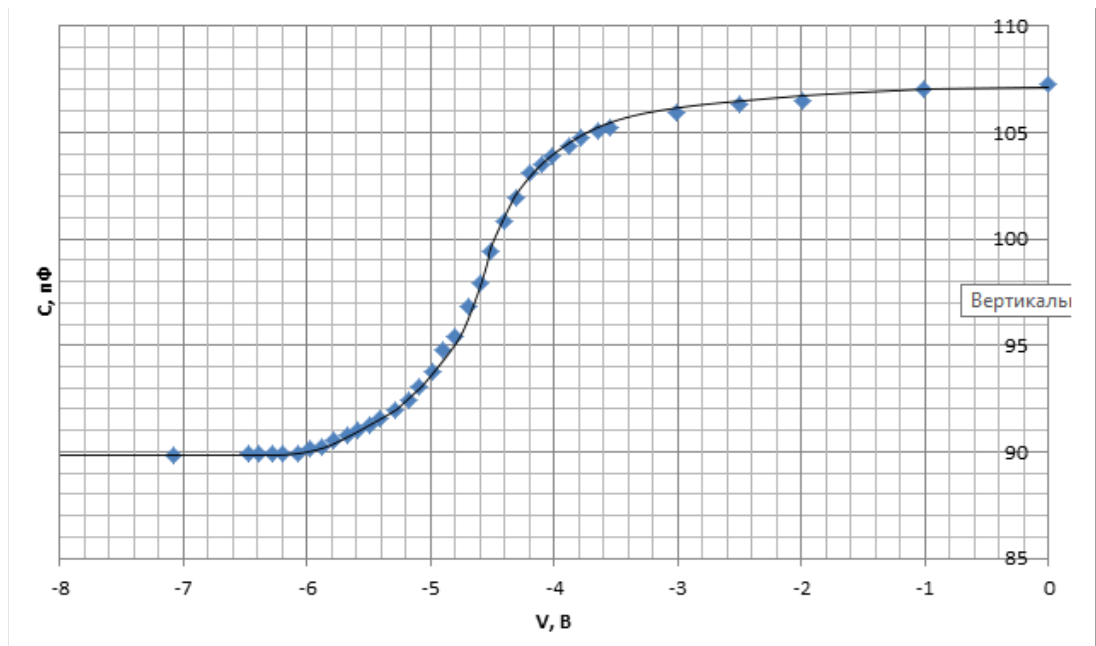


Рисунок 4.1.2 Експериментальна ВФХ №1

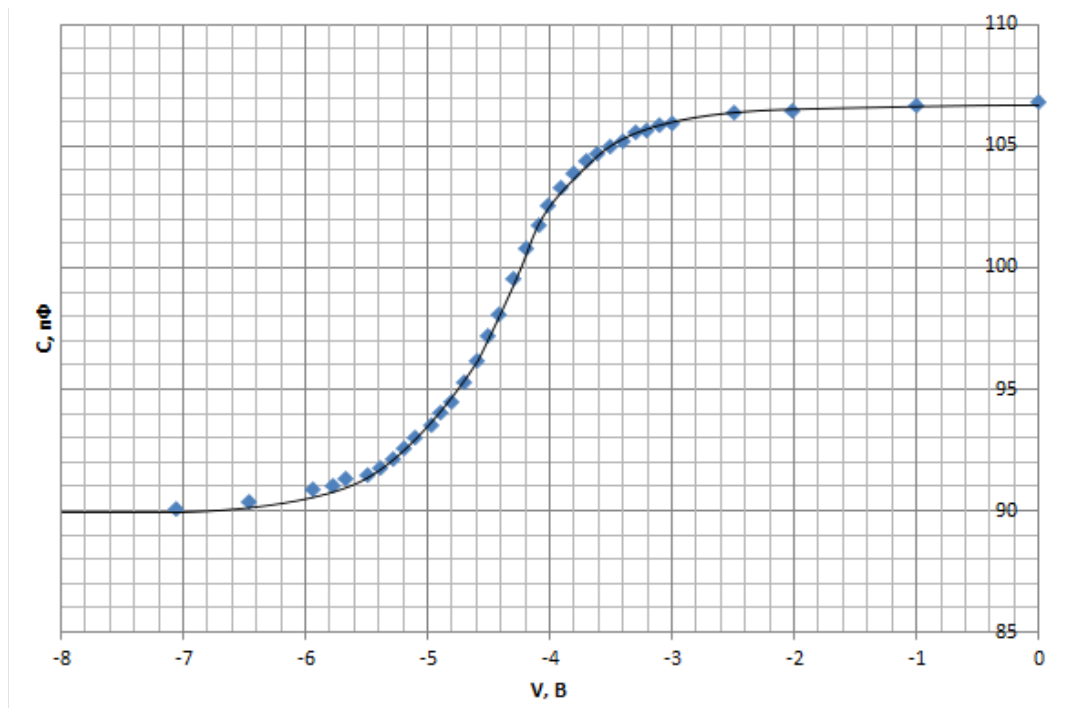


Рисунок 4.1.2 Експериментальна ВФХ №2

4.2 Аналіз поверхневих станів у кремнієвих МДН-структурах

Проаналізуємо та знайдемо всі основні характеристики МДН-структури. Для початку проведемо паралельні лінії осі напру і знайдемо мінімальну і максимальну ємність для подальших розрахунків.

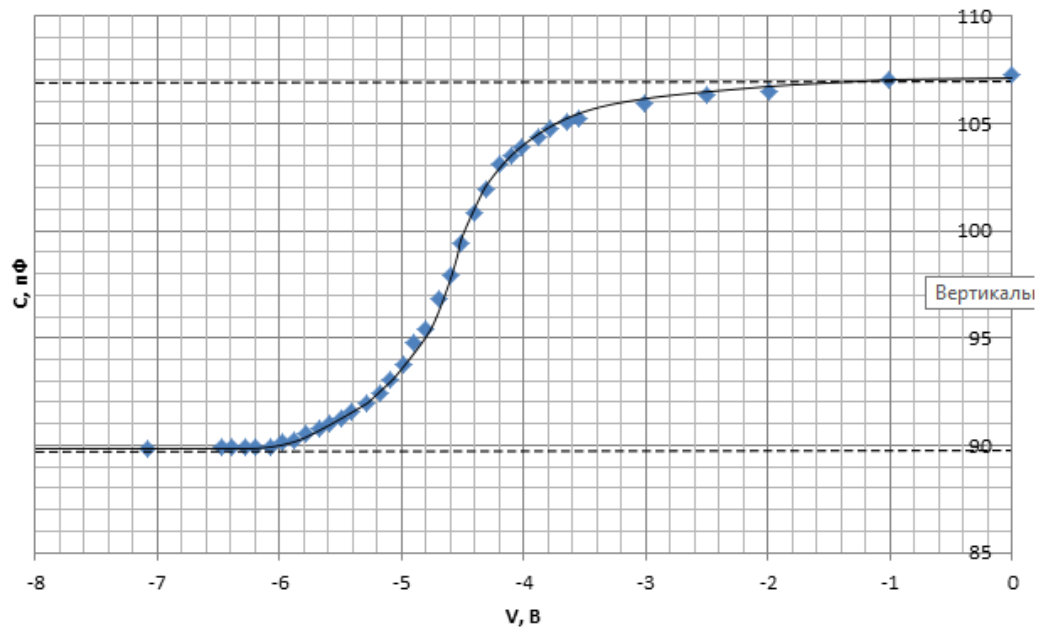


Рисунок 4.2.1 Розрахунок мінімальної і максимальної ємності

Таким чином отримаємо значення максимальної і мінімальної ємностей.

$$\begin{aligned} C_{max} &= 107,5 \text{ пФ}, \\ C_{min} &= 89.85 \text{ пФ}. \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

Так як максимальна ємність наближено дорівнює ємності діелектрика, то скориставшись рівнянням для ємності шару діелектрика, можемо знайти товщину шару:

$$d = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.9 \cdot 3,018 \cdot 10^{-7}}{107.5 \cdot 10^{-12}} = 0.0996 \text{ мкм}. \quad (4.2.2)$$

Далі, як було описано у минулому підрозділі побудуємо обернену квадратичну криву для ємності МДН-структури. Отримаємо наступну характеристику:

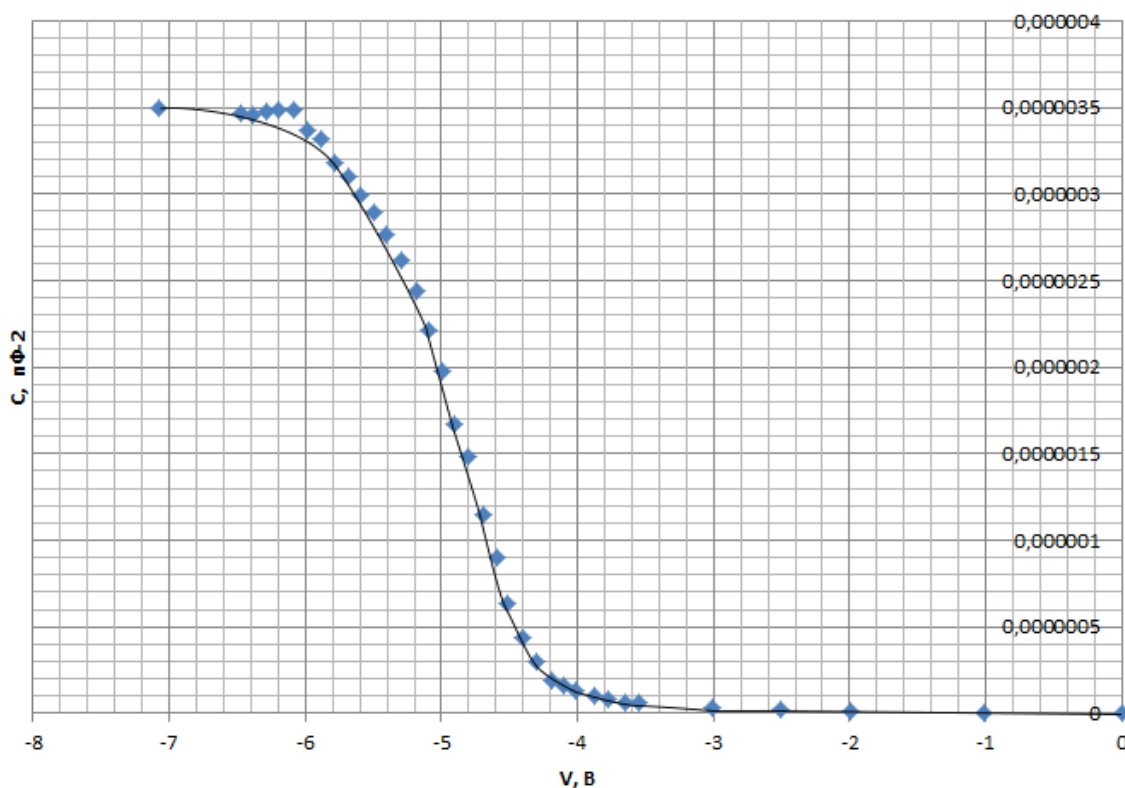


Рисунок 4.2.2 Обернена квадратична залежність ємності МДН структури

Як можна побачити з даної структури крива не ідеально лінійна, а загинається, на це впливають ємність поверхневих станів, а це свідчить про наявність останніх в виміряній МДН-структурі.

Далі, для того щоб визначити напругу плоских зон, проведемо дотичну до даної кривою, опустивши її на вісь напруг. В точці перетину дотичної і осі буде знаходитися точка напруги плоских зон. Отримаємо наступний графік:

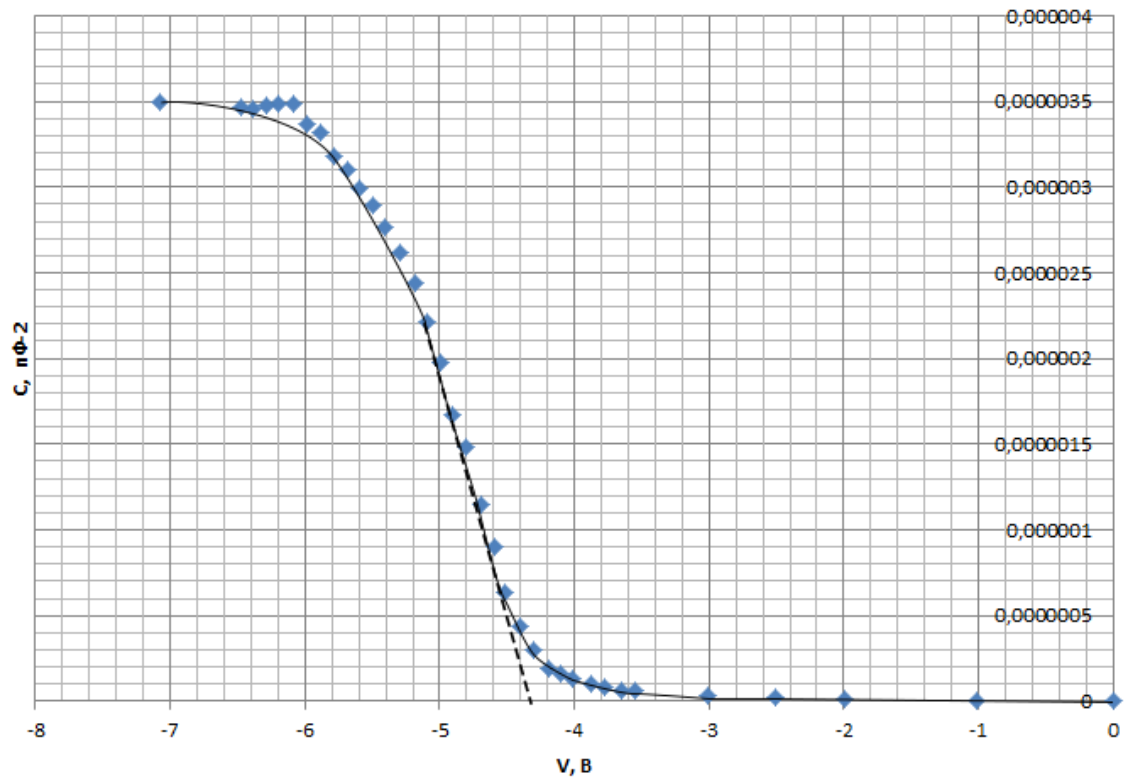


Рисунок 4.2.3 Визначення напруги плоских зон за експериментальною кривою.

Як можна бачити з графіку напруга плоских зон буде дорівнювати:

$$V_{FB} = -4,23 \text{ В.} \quad (4.2.3)$$

Далі для того щоб визначити ємність плоских зон, потрібно спроектувати напругу плоских зон на експериментальну вольт-фарадну характеристику і провести з точки перетину з нею до осі ємностей пряму. В точці перетину з віссю ємностей отримаємо ємність плоских зон.

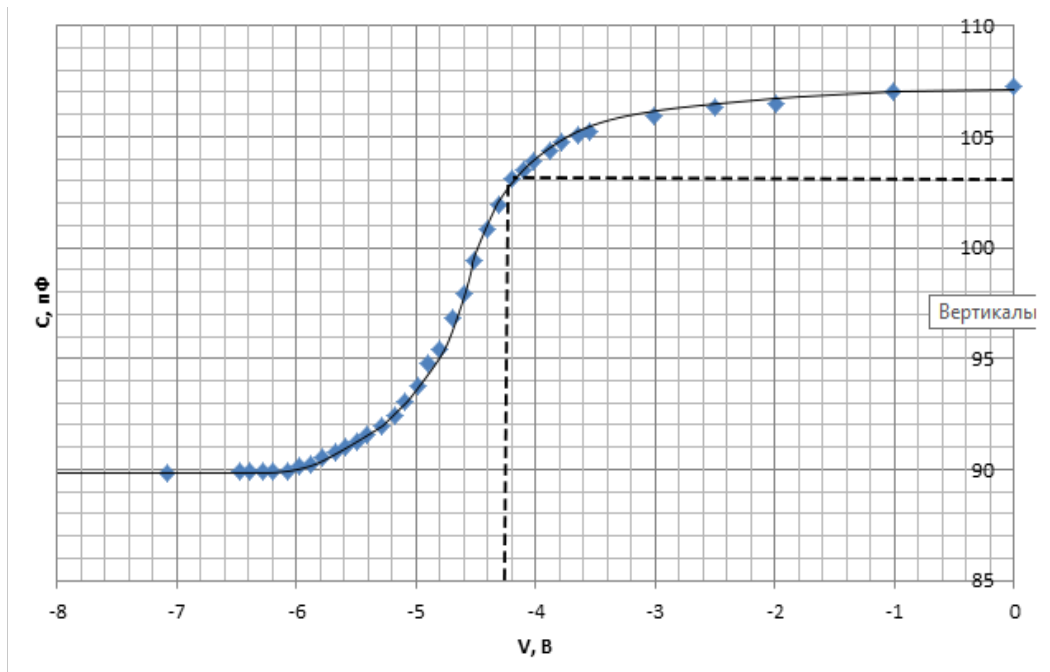


Рисунок 4.2.4 Визначення ємності плоских зон

З графіку можна побачити, що ємність плоских зон дорівнює:

$$C_{FB} = 103 \text{ пФ.} \quad (4.2.4)$$

Як напруга, так і ємність плоских зон є дуже важливими параметрами МДН-структури. Так наприклад за допомогою ємності плоских зон можливо визначити концентрацію летючих домішків. Так як в режимі збіднення і слабкої інверсії ємність області просторового заряду визначається як (3.2.5), то знаючи параметри матеріалу підкладки, концентрацію легуючої домішки можна визначити наступним чином:

$$N_D = \frac{kTC_{sc}^2}{\varepsilon_0\varepsilon_s q^2}. \quad (4.2.5)$$

Таким чином для даного зразку отримаємо наступну концентрацію легуючої домішки:

$$N_D = 3.94 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (4.2.6)$$

Визначивши напругу плоских зон, ми також легко можемо знайти заряд і густину поверхневих станів:

$$N_{ss} = \frac{C_{ox}(U_{FB} - \Delta\phi_{ms})}{q}. \quad (4.2.7)$$

Так, для даної ВФХ отримаємо наступні результати:

$$N_{ss} = \frac{107 \cdot 10^{-12}(-4,23 + 0,5)}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,826 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}. \quad (4.2.8)$$

Також, побудувавши графік для ємності (3.3.1) отримаємо наступну криву:

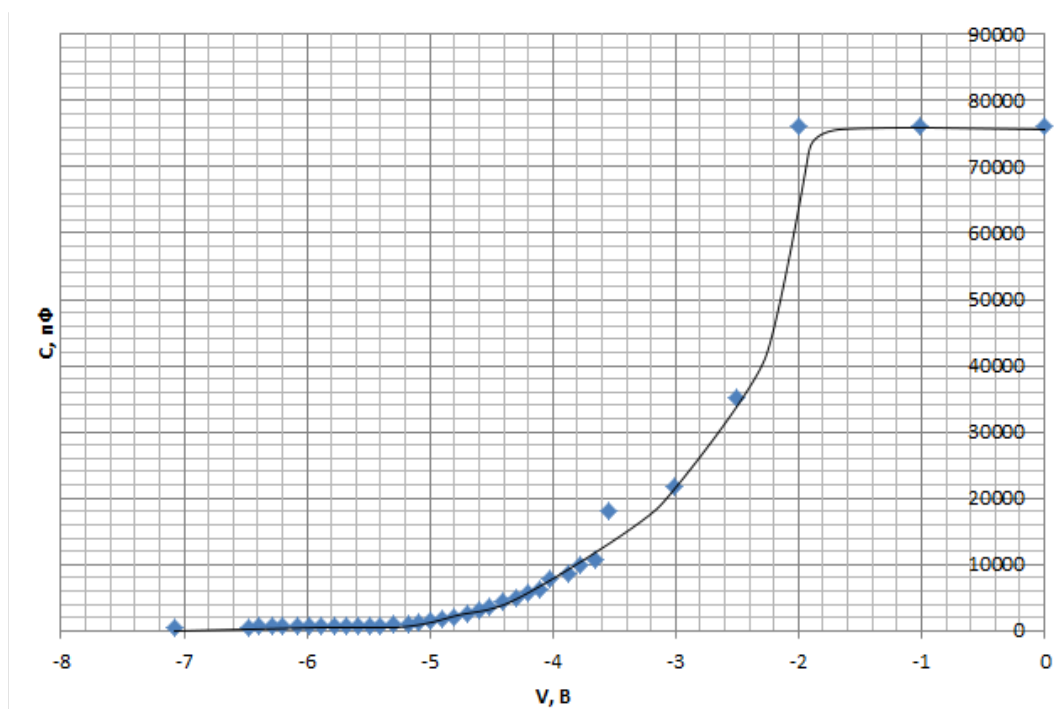


Рисунок 4.2.5 Графік залежності ємності МДН-структури, без врахування ємності діелектрика

Проаналізувавши даний графік можна побачити що при напрузі більше 2 В ємність перестає рости, хоча згідно теоретичним формулам вона має експоненціально зростати. Це говорить про те, що при напрузі більше 2 В напівпровідник у складі МДН-структури стає виродженим, а тому ємність перестає рости.

Проведемо аналогічний аналіз для другої ВФХ.

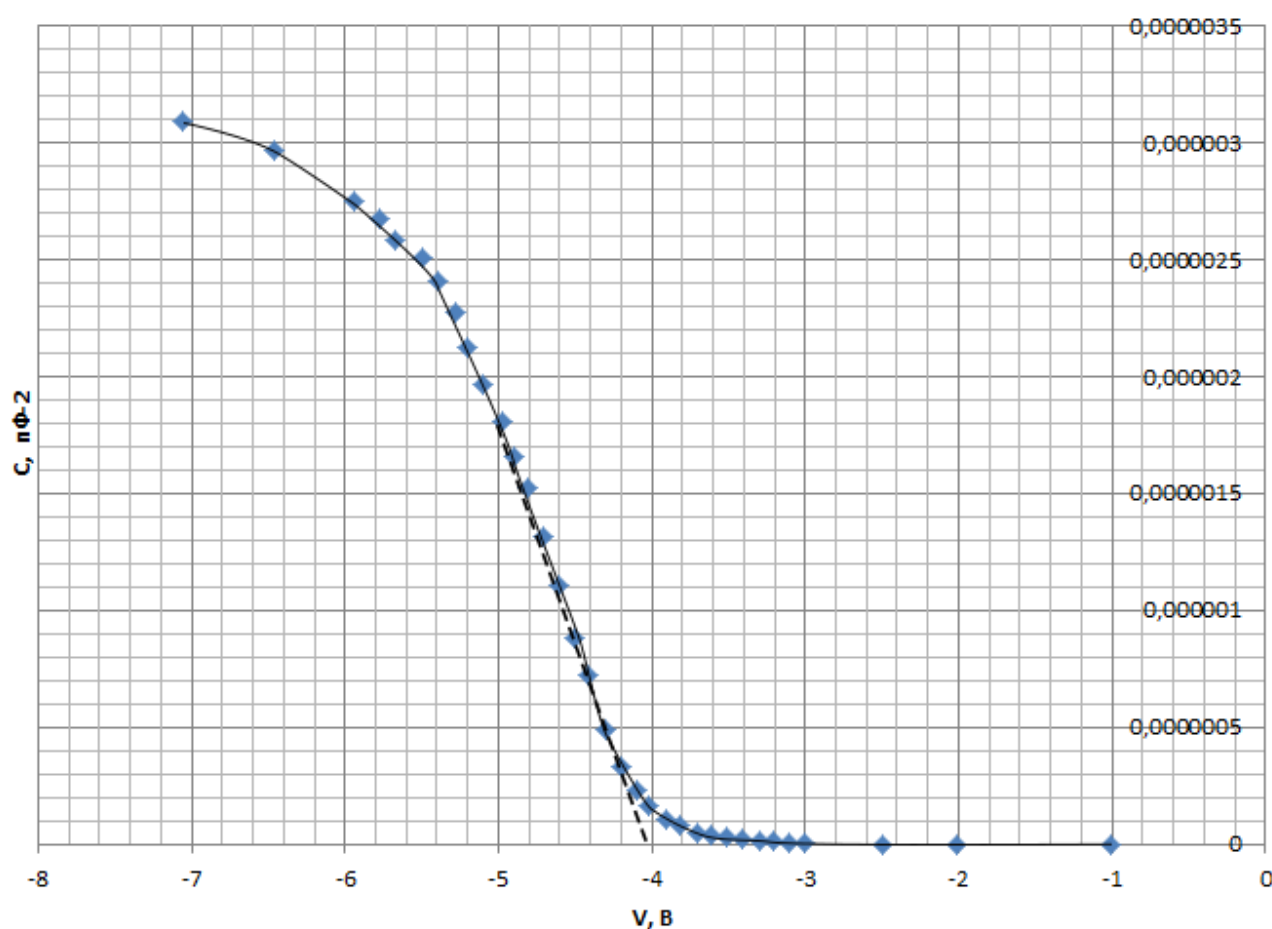


Рисунок 4.2.6 Визначення напруги плоских зон для другої ВФХ

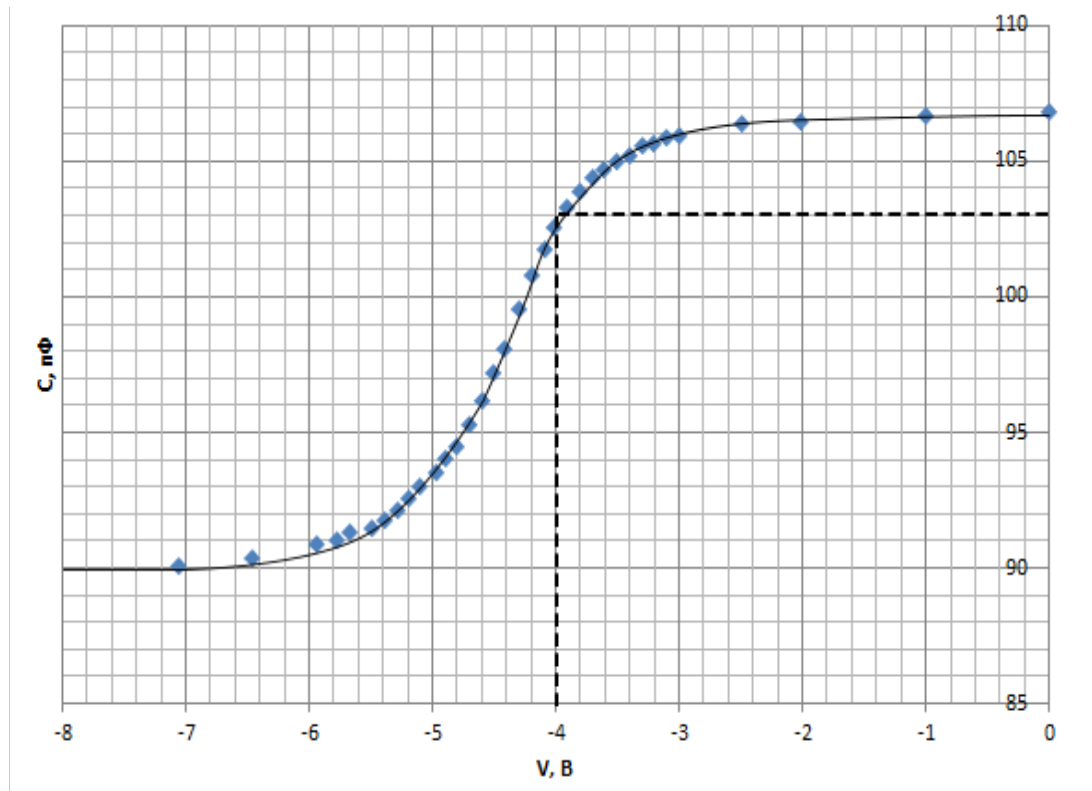


Рисунок 4.2.7 Визначення ємності плоских зон для другої ВФХ

Для другої ВФХ отримаємо наступні результати :

Мінімальна і максимальна ємності :

$$\begin{aligned} C_{max} &= 106,85 \text{ пФ}, \\ C_{min} &= 90,5 \text{ пФ}. \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

Товщина діелектричного шару:

$$d = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.9 \cdot 3,018 \cdot 10^{-7}}{106,85 \cdot 10^{-12}} = 0.10023 \text{ мкм}. \quad (4.2.10)$$

Напруга плоских зон:

$$U_{FB} = -4 \text{ В}. \quad (4.2.11)$$

Ємність плоских зон:

$$C_{FB} = 103 \text{ пФ}. \quad (4.2.12)$$

Концентрація легованої домішки:

$$N_D = 3.94 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (4.2.13)$$

Густина поверхневих станів:

$$N_{ss} = \frac{106,85 \cdot 10^{-12}(-4 + 0,5)}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,774 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}. \quad (4.2.8)$$

Проаналізувавши розрахунки для двох вольт-фарадних характеристик МДН-структур, можна відмітити, що ємність плоских зон і концентрація легованих домішок є однаковими для однієї напівпровідникової пластини з МДН-структурами. Це підтверджує доцільність і точність даного методу.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломної роботи було проаналізовано структуру метал-діелектрик-напівпровідник. Досліджено залежності ємності МДН-структури від потенціалу на границі поділу діелектрик-напівпровідник від поверхневого потенціалу. Проаналізовано важності напруги на затворі від поверхневого потенціалу і вольт-фарадні характеристики структури.

Досліджено основні електрофізичні властивості МДН-структури, а також їх дослідження стандартним методом через теоретичні криві. Були розраховані основні параметри МДН-структури.

Розглянуто вплив поверхневих станів на електрофізичні властивості МДН-структури. Розглянуто основні заряди що присутні в структурі. Проаналізовано особливості вольт-фарадних характеристик в околі напруги плоских зон, а також розроблена методика по розрахунку напруги плоских зон по експериментальним кривим, без використання теоретичних даних структури.

Було проведено експериментальні дослідження по вимірюванню і дослідженню вольт-фарадних характеристик МДН-структур. В ході аналізування отриманих результатів можна побачити, що визначені параметри співпадають з характеристиками підкладки. Це означає, що використаний стандартний метод можливо використовувати для точного визначення параметрів структур, але даний метод вимагає знання всіх теоретичних параметрів структури і умов вимірювання кривих. Неточність у цих значеннях приводять до похибок у вихідних даних. Розроблена методика не потребує цих даних, а результати розрахунків співпадають з теоретичними результатами, що спрощує використання її.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : В 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд.- М.: Мир, 1984.- 456 с., ил.
2. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб.пособие / В.А. Гуртов; ПетрГУ.- Петрозаводск, 2004. – 312 с.
3. Гуртов В.А. Твердотельная электроника. 2-е изд. — М.: Техносфера, 2007. — 408 с
4. Затьков И.И., Чиркин Л.К., Юрченко Е.П. Расчет МДП-приборов: Учеб.Пособие/ ЛЭТИ. – Л., 1991.-64 с.
5. Narain D. Arora. MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation: Theory and Practice./ Springer Science & Business Media, 2012 – 605 p.
6. Chih-Tang Sah Fundamentals of Solid-state Electronics/ World Scientific, 1991 – 1010 p.
7. Carlos Galup-Montoro, M rcio Cherem Schneider./ World Scientific, 2007 – 418 p.
8. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников Москва: Мир, 1977. — 678 с.
9. Л.Е. Гатько, С.Л. Дубашев, А.Г. Захаров, И.Н. Иванищева, Н.А. Кракотец, Е.Е. Нестюрина. Под ред. А.Г. Захарова. Руководство к лабораторным работам по курсу «Физические основы микроэлектроники». Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.63 с.
10. Технологии субмикронных структур микроэлектроники / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 270 с.
11. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Концевой Ю.А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2016.- 328 с.
12. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие .- Томск: Изд-во Том. Ун-та, 1989.-336 с.
13. Dieter K. Schroder. Semiconductor Material and Device Characterization/ John Wiley & Sons, 2006. – 800 p.

14. NANDITA DASGUPTA, AMITAVA DASGUPTA. SEMICONDUCTOR DEVICES: MODELLING AND TECHNOLOGY / PHI Learning Pvt. Ltd., 2004. – 344 p.

15. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов по специальности «Полупроводники и диэлектрики» и « Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» - 4-е изд. , перераб. и доп. – М: Высш. шк., 1987 – 479 с. ил.